

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**MODULÁRNÍ LABORATORNÍ ZAŘÍZENÍ
PRO STANOVENÍ PROCESNÍCH
CHARAKTERISTIK DVOUFÁZOVÉHO
TOKU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Bc. MATOUŠ JAKUBEC

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jakubec** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **409553**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modulární laboratorní zařízení pro stanovení procesních charakteristik dvoufázového toku

Název diplomové práce anglicky:

Modular laboratory equipment to evaluate process characteristic of multiphase flow

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte patentovou, průmyslovou a literární rešerši zaměřenou na konstrukční uspořádání zařízení s dvoufázovým tokem (biofiltry, náplňové kolonové aparáty) včetně možnosti dosažení rovnoměrného nátoky kapalin a plynů na pevné lože. Na základě získaných poznatků vypracujte možná koncepční řešení modulárního laboratorního zařízení pro stanovení procesních charakteristik dvoufázového toku. Navrženou technologii rozpracujte do formy projektové dokumentace obsahující všechny potřebné hydraulické, tepelné a pevnostní výpočty, specifikaci všech komponent, systému měření a regulace.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Lukáš Krátký Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **10.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.06.2017**

Platnost zadání diplomové práce:

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

18-04-2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením
vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a příjmení

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, za jeho cenné rady, podněty a připomínky, děkuji za jeho ochotu a trpělivost.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Matouš
Příjmení autora:	Jakubec
Název práce česky:	Modulární laboratorní zařízení pro stanovení procesních charakteristik dvoufázového toku
Název práce anglicky:	Modular laboratory equipment to evaluate proces characteristic of multiphase flow
Rozsah práce:	počet stran: 98 počet obrázků: 72 počet tabulek: 4 počet příloh: 1
Akademický rok:	2016/2017
Jazyk práce:	český
Ústav:	12118 Procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Procesní a zpracovatelská technika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
Oponent:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Anotace česky:	Tato práce se zabývá vytvořením návrhu modulárního laboratorního zařízení pro stanovení procesních charakteristik dvoufázového toku. Nejprve je popsán způsob čištění odpadního vzduchu pomocí biofiltru. Ve druhé části je provedeno měření procesních charakteristik typických náplní používaných v biofiltrech. V závěru práce je vytvořena kompletní výrobní dokumentace pro realizaci laboratorního zařízení.
Anotace anglicky:	This thesis deals with the design modular laboratory equipment to evaluate proces characteristic of multiphase flow. At first, a method of purifying waste gas using a biofilter is described. In the second part are measured the process characteristics of the typical materials used in the biofiter. In conclusion, is design

production documentation for the realisation laboratory equipment.

Klíčová slova:

dvoufázový tok, biofiltr, charakteristika lože

Klíčová slova anglicky:

a multiphase flow, a biofilter, characteristic of the filtering material

Využití:

výroba laboratorního zařízení, scale-up, charakteristika náplní bioriltru

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA BIOFILTRU	11
1.1.1 Princip biofiltrace	11
1.1.2 Popis biofiltru	13
1.1.3 Využití biofiltru	17
1.2 REŽIMI TOKU V BIOFILTRU	19
1.2.1 Charakteristické vlastnosti porézní vrstvy	19
1.2.2 Jednofázový průtok porézní vrstvou	21
1.2.3 Dvoufázový průtok porézní vrstvou	23
1.3 KONSTRUKCE BIOFILTRU	27
1.3.1 Základní požadavky konstrukce	27
1.3.2 Výrobní patenty	28
1.3.3 Ideové schéma.....	31
1.3.4 Rovnoměrný nátok.....	33
2 PRAKTICKÁ ČÁST	35
2.1 CÍLE NÁVRHU	35
2.1.1 Požadavky na design.....	35
2.2 PROUDOVÉ TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA	36
2.2.1 PTS magnetron	37
2.2.2 PTS vnější ohřev vody	38
2.2.3 PTS topný pás	39
2.3 EXPERIMENTY PRO ZÁKLADNÍ NÁVRH.....	40
2.3.1 Experimentální zařízení	41
2.3.2 Materiál filtračního lože.....	43
2.3.3 Porózní náplň	44
2.3.4 Tlaková ztráta náplně.....	47
2.3.5 Vlastnosti jednotlivých složek náplně	59
2.4 NÁVRHOVÉ VÝPOČTY A BASIC DESIGN.....	69
2.4.1 Výpočty.....	69
2.4.2 Basic design	72

2.5	VÝROBNÍ DOKUMENTACE	74
2.5.1	3D model.....	74
2.5.2	Filtr se zatěžováním	75
2.5.3	Filtr se sprchou.....	77
2.5.4	Plastový díl	79
2.5.5	Spodní díl – vstup vzduchu.....	81
2.5.6	Ohřev a měření teploty	83
2.5.7	Vrchní díl – zatěžování	85
2.5.8	Vrchní díl – sprchování.....	86
2.6	KONCEPT MĚŘENÍ A REGULACE	87
3	SCALE-UP	89
	ZÁVĚR	90
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	92
	SEZNAM OBRÁZKŮ	94
	SEZNAM TABULEK	97
	SEZNAM SYMBOLŮ	98

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá průtokem tekutin porézní vrstvou. V průmyslu se s touto problematikou často setkáváme a při návrhu zařízení je zapotřebí stanovit procesní charakteristiky toku médií danou vrstvou. V praxi se řeší jednofázový průtok tekutiny, kdy protéká pouze kapalina nebo plyn. Pokud však náplň prochází obě složky současně, hovoříme o dvoufázovém průtoku.

Výskyt jednofázového případně dvoufázového toku najdeme hlavně u filtrů a náplňových aparátů. Filtry se dělí na koláčové a hloubkové, přičemž čištěná tekutina prochází přes porézní překážku. V praxi nalezneme spoustu druhů a uspořádání těchto zařízení. Příkladem může být nuč, listové filtry, kalolisy, písková filtrace. Náplňovými aparáty rozumíme zařízení, které jsou vyplněny pravidelnými tělisky, kompaktní pórovitou vrstvou nebo vrstvou zrnitého materiálu. Cílem je vytvořit co největší povrch náplně na jednotku objemu zařízení, aby přenos tepla a hmoty, ke kterému zde dochází, byl maximální. Jedná se třeba o vysoké pece, chemické reaktory, regenerační výměníky (jednofázový tok) a ratifikační nebo extrakční kolony, absorbéry (dvoufázový tok).

Další aplikací dvoufázového toku mohou být biofiltry. V nich dochází k čištění plynu, tedy eliminaci těkavých organických látek, zápachových látek a některých anorganických látek. Tato metoda se stále rozšiřuje, neboť je z energetického hlediska nenáročná a účinná. Princip biofiltrace spočívá v tom, že náplň biofiltru prochází znečištěný vzduch, který je vyčištěn pomocí mikroorganismů (houby, bakterie, kvasinky), jež jsou ve vrstvě obsaženy a rozkládají nebo biotransformují organické polutanty či zápachové látky. Pro mikroorganismy jsou tyto nežádoucí látky zdrojem potravy a energie pro růst. Škodliviny přetvářejí na oxid uhličitý, vodu, mikrobiální biomasu, přičemž vzniká teplo. Při biotransformaci dojde k přetvoření škodlivin na jiné neškodné látky. Jako náplň biofiltrů se dá využít celá řada materiálu, ať už přírodní (kůra, štěpka, rašelina, humus), nebo inertní materiály (zeolit, aktivní uhlí, umělohmotné vestavby). Pokud hovoříme o klasickém biofiltru s pevným ložem, dochází v něm pouze k jednofázovému proudění plynu skrz lože. Znečištěný plyn je před vstupem dle potřeby zvlhčen, ohřát a jinak předupraven. Pokud však dochází ke zkrápění lože kapalinou, zařízení se nazývá biofiltr se zkrápěným ložem, neboli „biotricling filter“. Zde se již jedná o dvoufázový průtok plynu a kapaliny.

V mé práci jsem se vzhledem k širokému uplatnění jednofázového a dvoufázového toku v průmyslu vymežil na aplikaci biofiltru. V první části se zaměřuji na teorii jednofázového a dvoufázového průtoku porézní vrstvou a dostupné možnosti konstrukce biofiltrů, včetně jejich uspořádání a řízení. Od firmy CHEMCOMEX jsem obdržel náplň filtračního lože, u které jsem na experimentálním zařízení proměřil její vlastnosti. Tyto výsledky jsem vyhodnotil a zpracoval. Cílem práce je návrh modulárního laboratorního zařízení pro stanovení procesních charakteristik dvoufázového toku v biofiltru. Z dosažených poznatků jsem tedy vytvořil scale-up a výrobní dokumentaci dle požadavků pro zhotovení laboratorního zařízení, které bude vyrobeno a sestaveno ve školní laboratoři.

1 TEORETICKÁ ČÁST

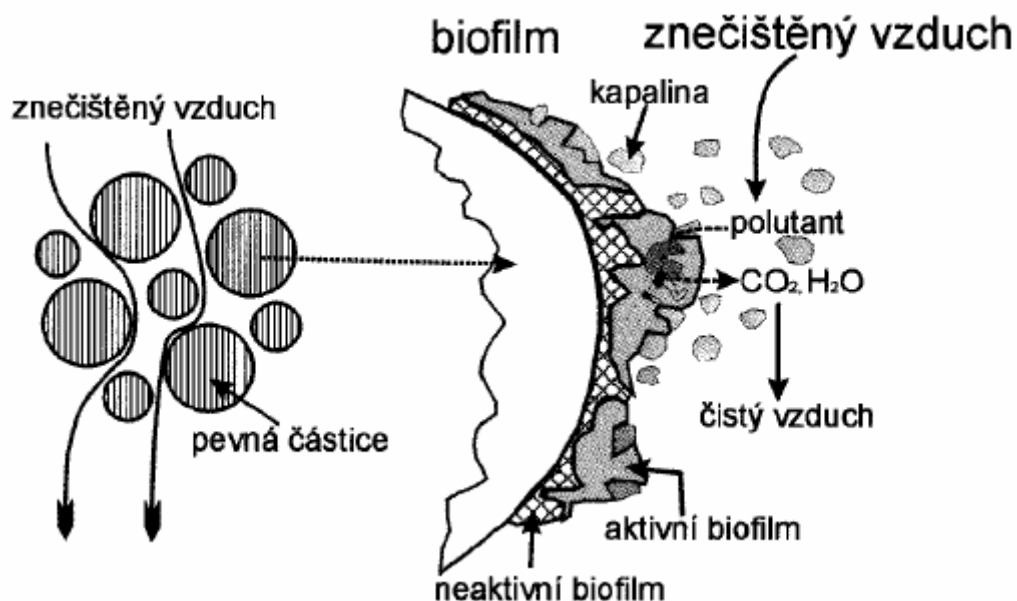
1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA BIOFILTRU

Biofiltr je zařízení sloužící k odstraňování zápašných, organických a některých anorganických látek ze znečištěných plynů, které mohou vznikat například při zpracování vedlejších živočišných produktů a odpadů, kompostování, výrobě nábytku či obuvi. Mezi hlavní výhody tohoto způsobu čištění patří nízké provozní náklady. Tím dochází ke zdokonalování a inovacím v této technologii, která je dnes stále oblíbenější. Hlavní uplatnění mají u nízkých koncentrací biologicky odbouratelných látek, kde fungují při správných podmínkách velmi dobře a účinně (Marada, 2007).

1.1.1 Princip biofiltrace

Organické nebo anorganické pachové látky, které se vyskytují ve znečištěném vzduchu, jsou odbourávány pomocí mikroorganismů, jenž jsou obsaženy na pevném nosiči biofiltru. Mikroorganismy tyto látky transformují nebo odbourávají. Používají je jako zdroj energie a uhlíku pro syntézu zásobních látek a nových buněk. Část spotřebují na novou buněčnou hmotu (biomasu) a zbytek oxidují na oxid uhličitý a vodu. Tento proces můžeme běžně pozorovat v přírodě.

Vzduch znečištěný polutanty tedy vstupuje do biofiltru, kde na pevném nosiči (náplni biofiltru) jsou imobilizovány mikroorganismy, které tvoří tenkou vrstvu zvanou biofilm. Ten obsahuje hlavně bakterie, dále pak nižší houby, prvoky a bezobratlé. Proces je vícestupňový a je znázorněn na obr. 1.1. V kapalně fázi (vodě) se nejprve rozpustí molekula polutantu. Ta pak prochází biofilmem k bakteriální buňce, kde musí projít skrz její buněčnou membránu. Poté již následuje rozklad polutantu. Vznikající energie je použita na syntézu buněčné hmoty a rozmnožování (Marada, 2007).



Obr. 1.1. Princip biofilmu (Marada, 2007)

Plyn lze brát jako ideální, neboť jeho tlak je nízký. Stejně tak i koncentrace polutantů. Také se uvažuje laminární proudění, protože rychlosti vzduchu nejsou vysoké. Při přenosu znečišťujících látek z plynu do biofilmu se tedy uvažuje dvoufilmová teorie. Tu můžeme popsat následovně:

$$M_i = K_L \cdot a(C_{Si} - C_{Li}) \quad (1.1-1)$$

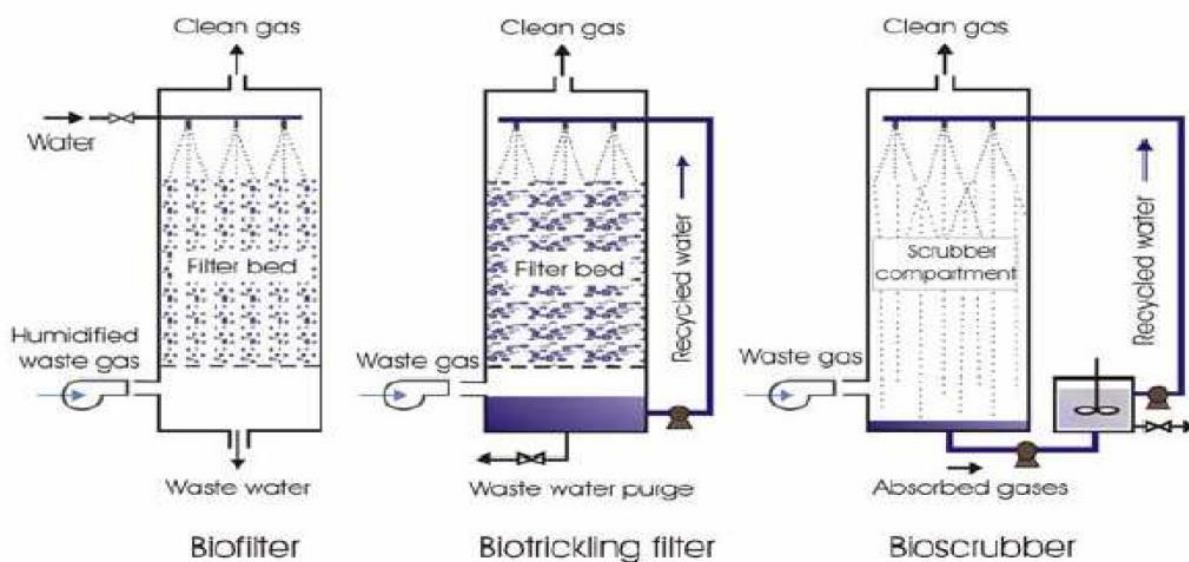
(M_i – rychlost přenosu hmoty látky i [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; K_L – koeficient rychlosti přenosu hmoty [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]; a – specifický povrch náplně [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]; C_{Si} – koncentrace látky i v kapalně fázi za rovnovážných podmínek [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; C_{Li} – aktuální koncentrace látky i v kapalně fázi [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]).

Jestliže je biofiltr provozován správně, pak rychlost přenosu hmoty z rovnice (1.1-1) limituje možné množství vyčištěného plynu (Matějů, 2005). Z toho vyplývá i určení doby zdržení vzdušiny v biofiltru. Nesmíme však zapomenout na látkové zatížení (množství polutantů za časovou jednotku), protože by mohlo dojít k výraznému snížení účinnosti čištění, případně i k otravě mikroorganismů polutantem.

1.1.2 Popis biofiltru

Biofiltrem se tedy rozumí zařízení, ve kterém dochází k řízenému styku znečištěného vzduchu s mikroorganismy. Plyn je tlačěn do nádrže biofiltru většinou přes mezidno, jež slouží jako distributor, aby byl tok laminární a v celém průřezu lože rovnoměrný. Existují tři základní typy biofiltrů, které jsou zobrazeny na obr. 1.2. (Marada, 2007)

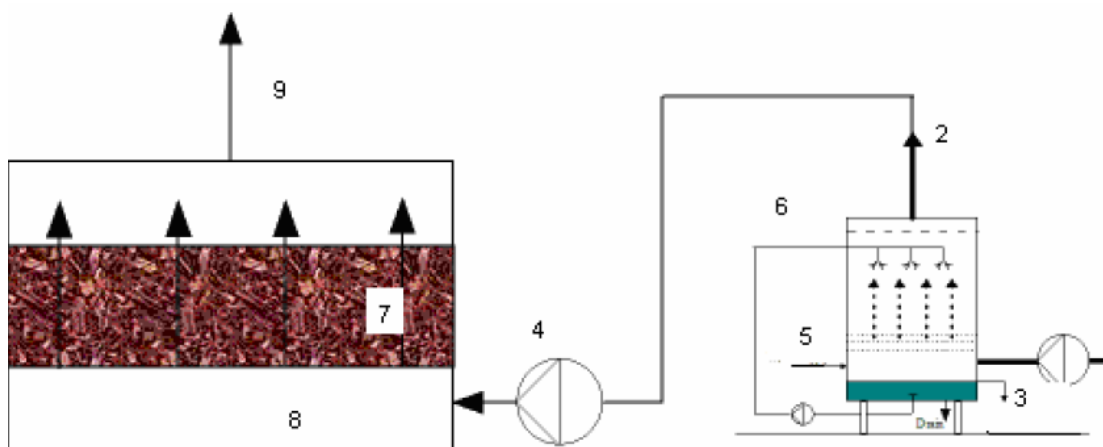
- Biofiltr s pevným ložem
- Biofiltr se zkrápěným ložem
- Biologická pračka (bioskruber)



Obr. 1.2. Typy biofiltrace (Marada, 2007)

Dnes se využívá speciálního složení lože, které zvyšuje odbourané množství polutantů v jednotce objemu náplně, dále lze regulovat pH, lépe zadržuje vodu, optimalizuje distribuci živin, má větší specifický povrch atd. U biofiltru s pevným ložem dochází k předúpravě vzduchu. Před vstupem je zvlhčován a regulován na stálou teplotu. Skrápěné biofiltry se používají pro některé druhy polutantů. U nich se používají inertní materiály typu zeolit, umělohmotné prvky či aktivní uhlí. Skrápí se vodou, roztokem živin nebo střídavě. Výhodou je větší odbourávací kapacita polutantů (Matějů, 2005).

První zmiňovaný typ (s pevným ložem) je nejpoužívanější. Pro lepší představu, jak biofiltry fungují, uvedu na následujícím obrázku stručný popis.



Obr. 1.3. Schéma biofiltru s pevným ložem (Auterská, 2006)

1 – přívod odpadního vzduchu, 2 – zvlhčený vzduch po průtoku vodní pračkou, zbavený pevných nečistot a částečně pachových látek, 3 – přepad znečištěné odpadní vody, 4 – ventilátor, 5 – přívod čisté vody, 6 – recirkulace prací vody, 7 – náplň biofiltru, 8 – rozvod odpadního vzduchu, 9 – vyčištěný odpadní vzduch.

Přívod odpadního vzduchu

Do biofiltru je vzduch primárně tlačěn do dna, což se ukázalo jako lepší z hlediska kinetiky, než při odsávání za náplní. Pračka je vhodná pro aplikace, kde se v odpadním vzduchu vyskytují také tuhé nečistoty (mimo jiné i tuky a barvy). V ní se odstraní 60–80 % těchto nečistot. Další výhodou pračky vzduchu je bezesporu zvlhčení, které usnadňuje přestup polutantu k mikroorganismům skrz biofilm.

Nosič biomasy

Nosič biomasy by měl mít dostatečnou poróznost, která se ideálně pohybuje v rozmezí 40–60 %. Taktéž chceme co největší plochu biofilmu, jež zaručí specifický povrch náplně v rozmezí 100–800 m².m⁻³. Typickými materiály jsou kůra stromů, štěpky, kokosová vlákna, rašelina, humus (tedy přírodní materiály) nebo zeolit, aktivní uhlí, umělohmotné vestavby (inertní materiály). Základními funkcemi a vlastnostmi, které by měla náplň splňovat jsou:

- Zásobárna vody.
- Zásobárna látek nezbytných pro činnost mikroorganismů, které nejsou v přiváděném vzduchu.
- Vyrovnává kolísání koncentrace polutantů, teploty, vlhkosti a pH.
- Schopnost sorbovat polutanty.
- Zásobárna živin v době odstávky.
- Umožňuje zásobení mikroorganismů kyslíkem.
- Dostatečně porézní, aby byly malé tlakové ztráty.
- Lože by nemělo samo o sobě zapáchat.
- Nízké pořizovací náklady.
- Snadná likvidace.

Bakteriální kultura

Bakteriální kultura je schopná sama se na náplni vytvořit za 2–3 měsíce, pokud budeme přivádět znečištěný plyn s daným typem polutantu. Avšak z technologického hlediska by byl tento proces příliš dlouhý. Pokud tedy máme v závodě, kde používáme biofiltr, i čističku odpadních vod, která pracuje s podobným znečištěním, dají se mikroorganismy zaočkovat z kalu čističky. Jestliže se však jedná o zvláštní znečištění, jsou bakteriální kultury vytvořeny v laboratoři. Po zavedení těchto kultur jsou biofiltry schopné plného provozu dosáhnout v řádu jednotkách dnů. Nikdy by se však nemělo jednat o monokulturu mikroorganismů, která je velmi náchylná na mutace při jiné kontaminaci.

Nutrienty

Mezi nutrienty patří dusík, fosfor, draslík, hořčík, kobalt, měď atd., které mikroorganismy potřebují pro tvorbu nové buněčné hmoty. Do syntetických náplní se tyto prvky musejí dodávat.

Purf pH (stabilizátor)

Jedním z produktů biodegradace je slabá kyselina uhličitá (H_2CO_3), která snižuje pH prostředí lože. Pokud se výrazně změní, vede to až ke ztrátě funkčnosti biofiltru, proto je zapotřebí jej kontrolovat a regulovat dávkováním stejně jako nutrienty.

Teplota

Ideální provozní teplota pro mikroorganismy v biofiltrech je 10–25 °C. Pokud teplota klesne pod 10 °C, dochází ke snížení aktivity, tím tedy ke snížení účinnosti zařízení. Naopak při teplotách nad 40 °C, i krátkodobě, je lože filtru sterilizováno.

Vlhkost nosiče

Požadovaná vlhkost náplně je 60–80 %. Pokud je biofiltr velkoplošný, nebo vystaven teplému suchému vzduchu či otevřený v letním počasí, pračky vzduchu nedokáží zajistit potřebnou vlhkost. Instalují se tedy zařízení pro povrchové zkrápění lože (kombinace vody a živin).

Možné problémy

Zásadním problémem v loži biofiltru je riziko tvorby vzduchových komínů. Nebezpečí vzniká zejména u použití přírodních materiálů nosiče mikroorganismů, kde dojde k mineralizaci, sesedání což vede ke zvyšování tlakové ztráty, také k vysychání, a naopak zarůstání lože mikroorganismy v dobře zvlhčovaných částech. Vzduch začne proudit vzniklým komínem, neboť klade nejmenší odpor proudění. Snižuje se doba zdržení plynu ve filtru, tím pádem i účinnost. K eliminaci vzniku těchto problémů je zapotřebí dbát rovnoměrné distribuci vzduchu pod dno lože a dosažení laminárního proudění, stejně tak i shodné vlhkosti v celém loži, které by mělo být maximálně homogenní (Marada, 2007).

1.1.3 Využití biofiltru

Biofiltry se především používají pro rozklad snadno odbouratelných organických látek. Dále se aplikují pro některé anorganické látky, které lze touto metodou eliminovat (zejména amoniak a sodík). Podmínkou je jejich rozpustnost ve vodě. Často jsou tyto odstraňované látky zápašné nebo dokonce škodí lidskému zdraví, případně životnímu prostředí. Z těchto důvodů musí původce vzniku škodlivin tyto látky odbourávat.

Hlavním omezením je nízká koncentrace vstupujících polutantů. V literatuře se uvádí ideálně do 1000 ppm objemových. Ve skutečnosti pracují i 5000 ppm objemových. Vstupní znečištění závisí na druhu polutantu, biologické odbouratelnosti, či požadované výstupní čistotě. Jestliže je koncentrace vyšší než 1500 ppm, je zapotřebí zvážit z ekonomického hlediska i jiné konkurence schopné metody, jako je termická a katalytická oxidace, oxidace indukovaná UV světlem, skrubry (Marada, 2007).

Hlavní výhody (Matějů, 2005)

- Běžná účinnost až 90 %.
- Nízké investiční a provozní náklady.
- Nespotřebovává moc energie a neprodukuje další odpady.
- Nenáročná na obsluhu.

Nevhodná aplikace biofiltrů (Marada, 2007)

- Látky s nízkou schopností adsorpce.
- Látky nerozpustné ve vodě.
- Látky biologicky odbouratelné za dlouhou dobu.
- Látky, které mohou být toxické pro mikroorganismy.
- Pro extrémně nízké koncentrace polutantů, které vedou k možnému nedostatku živin.

Aplikace biofiltrů

Tabulka 1.1. prezentuje možnosti aplikace biofiltrů, které jsou již realizované u nás nebo v zahraničí.

Průmysl, služby	Polutanty odstraňované biofiltrací
Tiskařský	Ethylacetát, alkoholy
Výroba kabelů	Xylen
Výroba autokarů	Fenol, formaldehyd, ethanol
Výroba nábytku	Hexan, ethanol, aceton, styren, ethylacetát, toluen, xylen
Praní vlny	Amoniak, sirovodík, dimethylsulfid, dimethyldisulfid, diethylamin, methylmerkaptan
Výroba kompozitů	Cyklohexanon, methylethyl keton
Výroba laminátových dílů	Styren, epichlorhydrin, aceton
Kožedělný	Ethylacetát, aldehydy, ketony
Kompostování	Sirovodík, amoniak, terpeny, aminy, mastné kyseliny, merkaptany
Výroba pekařského droždí	Ethanol, aldehydy, ketony
Mechanicko-biologická úprava bioodpadů	Sirovodík, amoniak, mastné kyseliny, aminy
Chov vepřů a skotu	Sirovodík, amoniak, mastné kyseliny, kyselina máselná, aminy, methylsulfidy
Zpracování masa	Aldehydy (zapáchající), organické kyseliny, sirovodík, amoniak
Výroba gumových dílů	Ethylacetát, butylacetát, aceton
Kalové hospodářství ČOV	methanthiol, sirovodík, dimethylsulfid, dimethyldisulfid, triethylamin, amoniak, S-methylmethanthiosulfát, methylcyklohexan, cykloheptatrien
Výroba obuvi	Ethylacetát, butylacetát, aceton

Tab. 1.1. Praktická aplikace biofiltrace vzdušin (Matějů, 2005)

1.2 REŽIMI TOKU V BIOFILTRU

V biofiltru na čištění odpadního plynu se můžeme setkat s dvěma typy proudění, kdy záleží na druhu biofiltru. Pro biofiltr s pevným ložem je typický jednofázový průtok plynu. Pokud budeme uvažovat biofiltr se skrápěným ložem kapalinou (biotricling filtr), jedná se o protiproudý dvoufázový průtok porézní vrstvou.

Následující 3 podkapitoly, zabývající se průtokem porézní vrstvou, jsou převzaty ze skript Hydromechanické procesy I.

1.2.1 Charakteristické vlastnosti porézní vrstvy

Porézní vrstvou se rozumí vrstva materiálu, která umožňuje průtok tekutiny. Využívá se zejména při filtraci a v náplňových aparátech. Dle dané potřeby se volí materiál vrstvy. Může být tvořena kompaktní pórovitou přepážkou (plst', keramika, papír), vrstvou zrnitého materiálu (písek, aktivní uhlí), z částic pravidelného tvaru tzv. náplňových tělísek (kuličky, Raschigův kroužek, Pallův kroužek, Berlovo sedlo,...) nebo výplní (pletivo, rošty). Pokud chceme charakterizovat průtok porézní vrstvou, je třeba definovat některé veličiny, jež vrstvu popisují.

Charakteristický rozměr částic

Monodisperzní materiál je tvořen pouze jednou velikostí částic. Pokud máme částice kulového tvaru, jejich charakteristickým rozměrem je průměr D . Pokud jsou částice nekulové, jejich charakteristický rozměr se odvozuje od kulové částice.

Ekvivalentní průměr dané částice podle objemu je průměr kuličky, která má stejný objem jako daná částice.

$$D_V = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_j}{\pi}} \quad (1.2-1)$$

Ekvivalentní průměr dané částice podle povrchu je průměr kuličky, která má stejný povrch jako daná částice.

$$D_A = \sqrt{\frac{A_j}{\pi}} \quad (1.2-2)$$

Ekvivalentní průměr podle specifického povrchu je průměr kuličky, která má stejný poměr povrchu k objemu jako uvažovaná částice.

$$\frac{A_j}{V_j} = \frac{\pi \cdot D_p^2}{\pi \cdot \frac{D_p^3}{6}} = \frac{6 \cdot \pi \cdot D_p^2}{\pi \cdot D_p^3} \rightarrow D_p = \frac{6 \cdot V_j}{A_j} \quad (1.2-3)$$

Pokud se jedná o polydisperzní materiál (částice různé velikosti), určuje se frakční složení směsi. Představuje množství částic ve směsi o dané velikosti. Můj experiment bude probíhat na materiálu velmi polydisperzním, u kterého by určování frakčního složení bylo velmi složité a vzhledem k potřebnému vyhodnocení i zbytečné. Při vyhodnocování si vystačíme s odhadem ekvivalentního průměru D_p .

Porózita vrstvy

Porózita neboli mezerovitost ε je definována jako poměr objemu mezer (pórů) mezi částicemi k celkovému objemu vrstvy.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_s}{V} \quad (1.2-4)$$

(V – objem vrstvy, V_p – objem pórů, V_s – objem pevné fáze)

Ze vzorce (1.2-4) vyplývá, že ε teoreticky nabývá hodnot 0 až 1. Porózu ovlivňuje jak tvar, tak i uložení částic náplně. Jednou z možností, jak určit její velikost, je vytěsňování pórů kapalinou o známých vlastnostech a vážením. Tuto metodu budu aplikovat při určování porózity mé filtrační vrstvy.

Specifický povrch

Absolutní specifický povrch (hustota povrchu vrstvy) je povrch částic v objemové jednotce celé vrstvy. Ovlivňuje ji velikost a tvar částic a porózita vrstvy.

$$a = \frac{A}{V} \quad (1.2-5)$$

(A – celkový povrch částic)

Vlastní specifický povrch je poměr povrchu částic k objemu pevné fáze částic.

$$a_v = \frac{A}{V_s} \quad (1.2-6)$$

V následujících odvozeních v kapitole 1.2.2 budeme potřebovat vztahy mezi absolutním a specifickým povrchem a ekvivalentním průměrem podle specifického povrchu. Jejich odvození je také rozvedeno ve zmíněných skriptech Hydromechanické procesy I, já však tyto vztahy vzhledem ke zjednodušení v této práci pouze převežmu.

$$a = (1 - \varepsilon)a_V \quad (1.2-7)$$

$$D_p = \frac{6}{a_V} \quad (1.2-8)$$

Sféricita

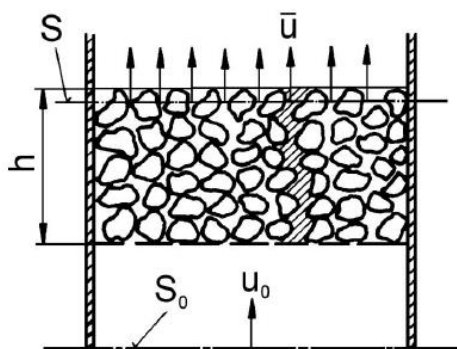
Sféricita je definována jako poměr povrchu kuličky o stejném objemu jako částice k povrchu částice. Pokud tedy máme nekulovou částici je její sféricita vždy menší než 1.

$$\sigma = \frac{A_K}{A_j} = \frac{\pi \cdot D_V^2}{\pi \cdot D_A^2} = \left(\frac{D_V}{D_A}\right)^2 \quad (1.2-9)$$

1.2.2 Jednofázový průtok porézní vrstvou

Jedná se tedy o průtok jedné tekutiny (plynu nebo kapaliny) porézní vrstvou. Při výpočtech průtoku nás zajímá ztráta mechanické energie. Porézní vrstvu při odvození vztahů si představujeme jako soustavu kanálů proměnlivého průřezu. Vychází se tedy ze vztahu tlakové ztráty při proudění potrubím nekruhového průřezu.

$$e_z = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{\bar{u}^2}{2} \quad (1.2-10)$$



Obr. 1.4. Jednofázový průtok porézní vrstvou

Je potřeba do vztahu (1.2-10) dosadit místo veličin charakterizujících potrubí, veličiny platné pro vrstvu. Střední rychlost proudění v pórech vychází z rovnice kontinuity.

$$u_0 \cdot S_0 = \bar{u} \cdot S \rightarrow \bar{u} = \frac{S_0}{S} u_0 \quad (1.2-11)$$

(S_0 – průřez celé vrstvy, S – střední volný průřez ve vrstvě, u_0 – mimovrstvová rychlost)

Další úpravou bude vynásobení (1.2-11) výškou vrstvy h a následné dosazení ze vztahu (1.2-4).

$$\bar{u} = \frac{S_0 \cdot h}{S \cdot h} u_0 = \frac{V}{V_p} u_0 = \frac{u_0}{\varepsilon} \quad (1.2-12)$$

Ještě musíme určit střední ekvivalentní průměr d_e a opět vynásobit výškou vrstvy h .

$$d_e = 4 \frac{S}{O} = 4 \frac{S \cdot h}{O \cdot h} \approx 4 \frac{V_p}{A} \quad (1.2-13)$$

(O – celkový smáčený obvod)

Když ve vztahu (1.2-13) vydělíme čitatele i jmenovatele V (celkový objem vrstva) a dosadíme ze vztahů (1.2-4), (1.2-5), dostaneme d_e závislé na porositě a specifickém povrchu.

$$d_e = 4 \frac{V_p/V}{A/V} = 4 \frac{\varepsilon}{a} \quad (1.2-14)$$

Nyní již dosadíme rovnice (1.2-12) a (1.2-14) do původního vztahu (1.2-10).

$$e_z = \frac{\lambda}{8} \frac{a}{\varepsilon^3} h \cdot u_0^2 \quad (1.2-15)$$

Poslední rovnice (1.2-15) je již vyjádřený vztah pro danou vrstvu, ale je nutné ji ještě upravit. Za a dosadíme rovnici (1.2-7), kde se vyskytuje vlastní specifický povrch a_v . Ten však vyjádříme pomocí D_p z rovnice (1.2-8).

$$e_z = \frac{\lambda}{8} \frac{(1 - \varepsilon) a_v}{\varepsilon^3} h \cdot u_0^2 = \frac{6 \cdot \lambda}{8} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{h}{D_p} u_0^2 \quad (1.2-16)$$

Nahradíme ještě zlomek $6 \cdot \lambda / 8$ výrazem λ' . Ztráta v porézní vrstvě tedy bude:

$$e_z = \lambda' \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{h}{D_p} u_0^2 \quad (1.2-17)$$

Součinitel λ' je funkcí Reynoldsova čísla Re , které převedeme na veličiny platné pro porézní vrstvu.

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} = \frac{u_0 \cdot 4 \cdot \varepsilon \cdot \rho}{\varepsilon \cdot \mu \cdot a} = \frac{4 \cdot u_0 \cdot \rho}{\mu(1 - \varepsilon)a_v} = \frac{2}{3} \frac{u_0 \cdot D_p \cdot \rho}{(1 - \varepsilon)\mu} = \frac{2}{3} Re' \quad (1.2-18)$$

V experimentu nebudeme měřit tlakovou ztrátu v porézní vrstvě, ale tlakovou diferencí mezi tlakem na vstupu plynu do biofiltru a výstupem. Pro tlakovou diferencí platí:

$$\Delta p_z = e_z \cdot \rho \quad (1.2-19)$$

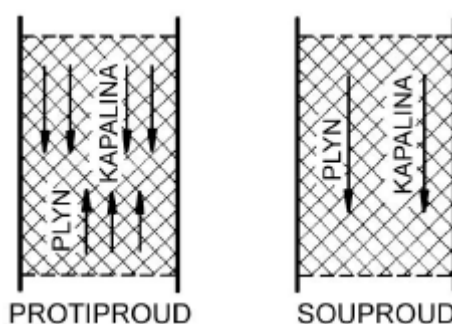
Pro scale-up zařízení je třeba z naměřených hodnot v experimentech vykreslit funkční závislost $\lambda' = f(Re')$. Konečné vztahy, které použijí, tedy jsou:

$$\Delta p_z = \lambda' \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{h}{D_p} u_0^2 \cdot \rho \quad (1.2-20)$$

$$Re' = \frac{u_0 \cdot D_p \cdot \rho}{(1 - \varepsilon)\mu} \quad (1.2-21)$$

1.2.3 Dvoufázový průtok porézní vrstvou

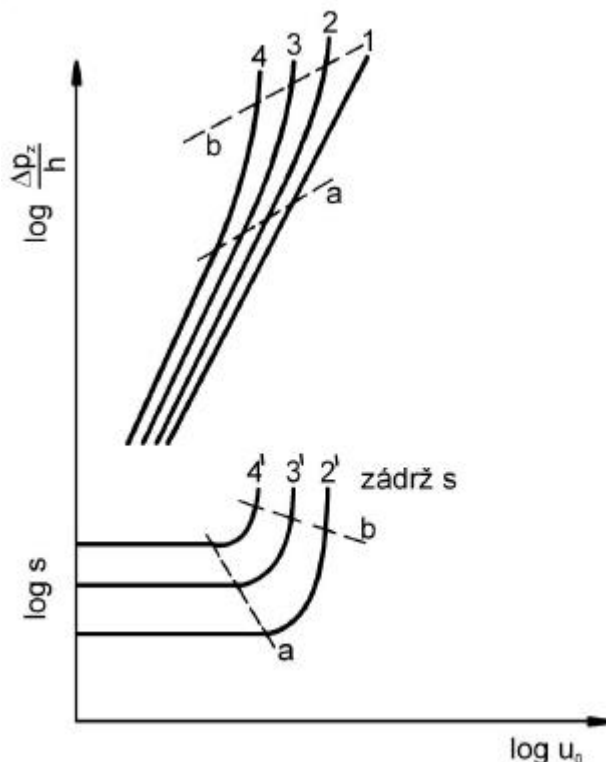
Při dvoufázovém průtoku protékají současně dvě tekutiny, tedy plyn a kapaliny. Právě kapalina smáčí povrch náplňového materiálu. Tím mění velikost a tvar pórů, kterými prochází nesmáčivý plyn (někdy pára či kapalina). Můžeme se setkat, jak se souproutdným, tak protiproudním tokem.



Obr. 1.5. Typy dvoufázového proudění porézní vrstvou

U tohoto toku je zapotřebí určit zadrž (saturaci) s . Určuje, jakou část objemu pórů vyplňuje smáčivá kapalina ($s = 1$ – protéká pouze kapalina, $s = 0$ – protéká pouze plyn).

Na obr. 1.6. je vykreslena závislost tlakového spádu ve vrstvě a zádrže na mimovrstvové rychlosti plynu, která nám charakterizuje proudění.

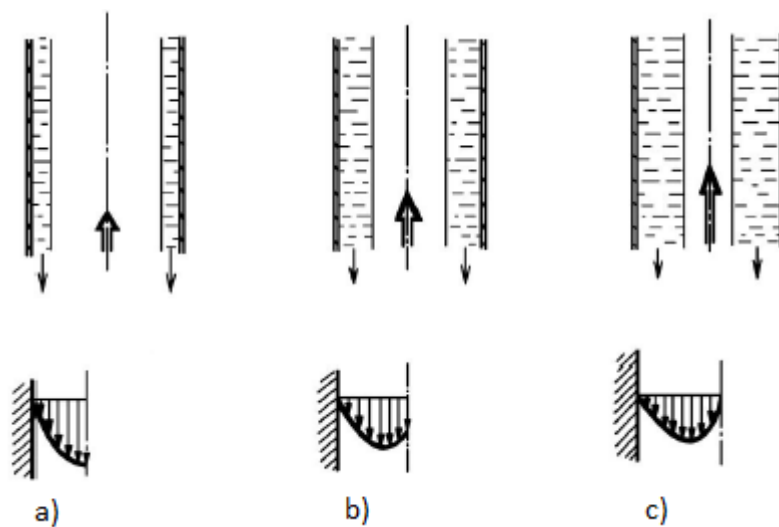


Obr 1.6. Tlaková difference a zádrž při dvoufázovém proudění vrstvou náplně

- 1 – závislost tlakového spádu na mimovrstvové rychlosti plynu pro suchou vrstvu náplně.
- 2, 3, 4 – závislost tlakového spádu na mimovrstvové rychlosti plynu při konstantních hodnotách průtoku kapaliny.
- 2', 3', 4' - odpovídající zádrž kapaliny.
- a – mez plnění (stav, kdy se začne projevit tření mezi plynem a kapalinou).
- b – mez zahlcení (tloušťka filmu roste, ale průtok kapaliny klesá; kapalina se začíná hromadit nad vrstvou).

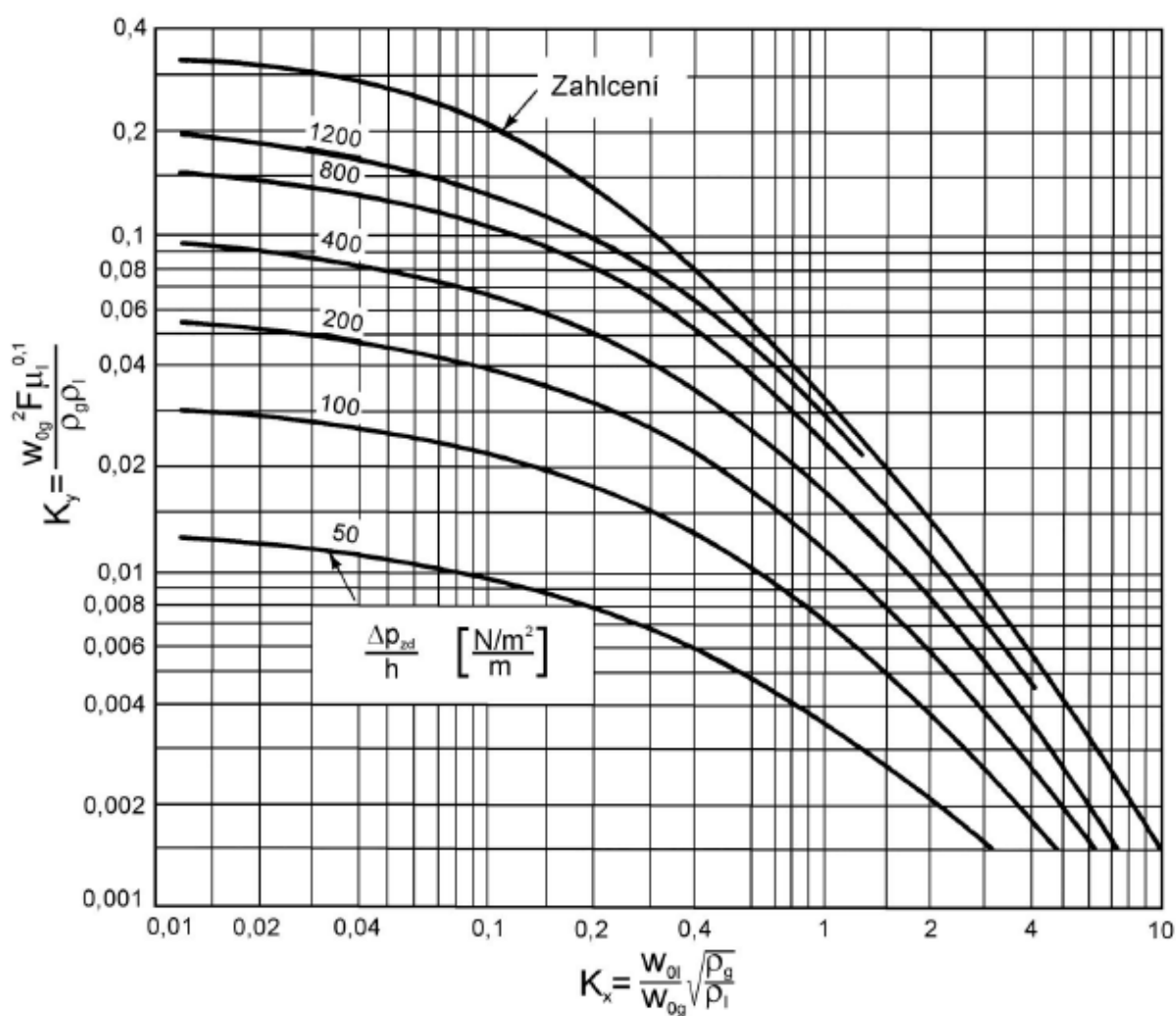
Pokud je tedy malý průtok plynu, neovlivňuje rozložení rychlosti ve stékajícím filmu (obr. 1.7. a). V obr. 1.6. se jedná o křivky 2, 3, 4 (pod čarou a), jež mají stejnou směrnici jako křivka 1 (suchá náplň). Tlakový spád se zvyšuje pouze vlivem tloušťky stékajícího filmu (vyšší průtok kapaliny), který zmenšuje velikost pórů. Mezi křivkami a, b v obr. 1.6. dochází ke zvětšování tloušťky filmu vlivem zvyšování průtoku plynu (dochází k nezanedbatelnému tření mezi tekutinami; plyn brzdí kapalinu, v níž se mění rychlostní profil obr. 1.7. b).

Obr. 1.7. c zobrazuje mez zahlcení. Pokud budeme průtok plynu i nadále zvyšovat, bude sice růst tloušťka filmu, ale průtok kapaliny vrstvou bude klesat. Jedná se o oblast nad křivkou b v obr. 1.6., tedy nad křivkou zahlcení. Pracovní rychlost plynu v protiproudých dvoufázových zařízeních musí být menší než rychlost zahlcení.



Obr. 1.7. Dvoufázové prodění svislou trubicí

Výpočet rychlosti zahlcení a tlakové ztráty



Obr. 1.8. Závislost $K_y = f(K_x, \Delta p_{zd}/h)$

Jednou z možností, jak určit rychlost zahlcení je z obr. 1.8. Vypočteme hodnotu kritéria K_x a z kritéria K_y (na svislé ose) odpovídajícího nejvyšší křivce (zahlčení) dopočteme rychlost plynu odpovídající zahlcení. Koeficient F se určí z tabulek, nebo vypočítá dle rovnice (1.2-24).

$$K_x = \frac{w_{0l}}{w_{0g}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (1.2-22)$$

$$K_y = \frac{w_{0g}^2 \cdot F \cdot \mu_l^{0,1}}{\rho_g \cdot \rho_l} \rightarrow w_{0g} \quad (1.2-23)$$

$$F = 0,3048 \frac{a}{\varepsilon^3} \quad (1.2-24)$$

Výsledná rychlost plynu je volena od 70 do 90 % rychlosti zahlcení.

1.3 KONSTRUKCE BIOFILTRU

Typů biofiltů je celá řada a vzájemně se od sebe liší tvarem, velikostí, způsobem uspořádání a řízení. Některé jsou otevřené do atmosféry a zabudované v zemi. Dříve se projektovali jako velkoplošné jednotky s výškou filtrační náplně do 1 m. Využívala se rašelina, kompost, vřes nebo kůra. Tato zařízení nebyla tak účinná, zabírala velkou plochu a problém jim dělala vyšší kolísavé koncentrace znečištění. Často bylo nemožné je umístit do závodů, které neměly dostatečné prostory. Dnešní biofiltry mají kombinované složení náplně uzpůsobené polutantům a řízenou kontrolu živin, pH, mineralizace, tlakové ztráty s mikrobiálními rozbory. To zapříčinilo vyšší účinnosti zařízení. Pokud je potřeba kvalitnější výstupní vzduch, je možné postavit několik biofiltrů za sebou i nad sebou (Marada, 2007).

1.3.1 Základní požadavky konstrukce

Základní podmínkou při návrhu biofiltru jsou vzduchotechnické parametry a hydraulické proudění vzdušiny. Rozvod vzduchu pod lože by měl být rovnoměrný, aby nedocházelo k nevyrovnanému zatížení v jednotlivých částech náplně.

Kolem celého obvodu se často klade zhruba 10 cm izolace, která zabraňuje průchodu vzduchu u stěn. Jinak u nich dochází k vyššímu průtoku a vysychání biofiltru v těchto místech.

Nosný rošt biomasy se klade kolem 0,5 m od dna zařízení. Důležité je, aby nepodléhal korozi a nedošlo k jeho zborcení. Výška vrstvy náplně se pohybuje v rozmezí 1–2 m s ohledem na tlakovou ztrátu vlivem průchodu vzduchu.

Je vhodné zařízení opatřit skrápěním pro snadné udržování správné vlhkosti. Pokud by došlo k přelití, nastane vyplavování mikroorganismů, zhutnění lože a větší tlaková ztráta. Důsledkem je výrazné snížení účinnosti a množství odpadní vody (Marada, 2007).

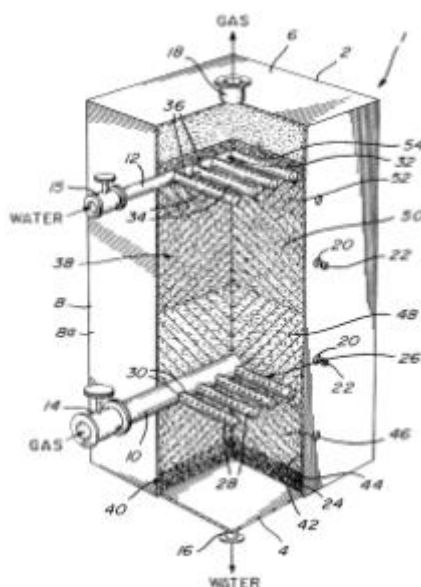
1.3.2 Výrobní patenty

Při zkoumání podaných patentů na biofiltry jsem narazil na spoustu vynalezených variant, které se od sebe liší typem náplně, uspořádáním toků, případně rovnoměrnou distribucí médií, konstrukcí a v neposlední řadě řízením. Z těchto důvodů zde prezentuji pouze pár návrhů, které mě zaujaly.

Biofiltr na čištění odpadní vody nebo plynu

Toto zařízení popisuje patent s číslem U.S. 09 114 078. Jedná se o biofiltr, kde je možné současně nebo zvlášť čistit vodu a plyn, přičemž voda teče shora dolů a plyn opačně. Hlavní výhodou tohoto zařízení je jeho variabilita v možnosti uplatnění na znečištění různého původu. Náplň je tvořena ve vrstvách. Pokud půjdu od spodu, jednotlivé složky jsou kamení (hrubší a jemnější frakce – nosná funkce), směs rašeliny a hoblin (ve 4 vrstvách o různém poměru množství jednotlivých složek – filtrační funkce), a nakonec vrstva jehličnaté kůry s rašelinou (izolační funkce). Výhodou je možné kompostování použitého lože, ale problémem je výrazné a rychlé stárnutí (smršťování, praskání, sušení atd.), které vede ke snižování průtoku.

Plyn je přiváděn do zařízení hlavní trubkou, jež se uvnitř rozvětjuje na trubky o menším průřezu, aby nedošlo k poklesu tlaku. Ty jsou děrované směrem vzhůru. Přívod vody je obdobný. Díry jsou opět směrem vzhůru, aby docházelo pouze k rovnoměrnému přetékání vody do lože.

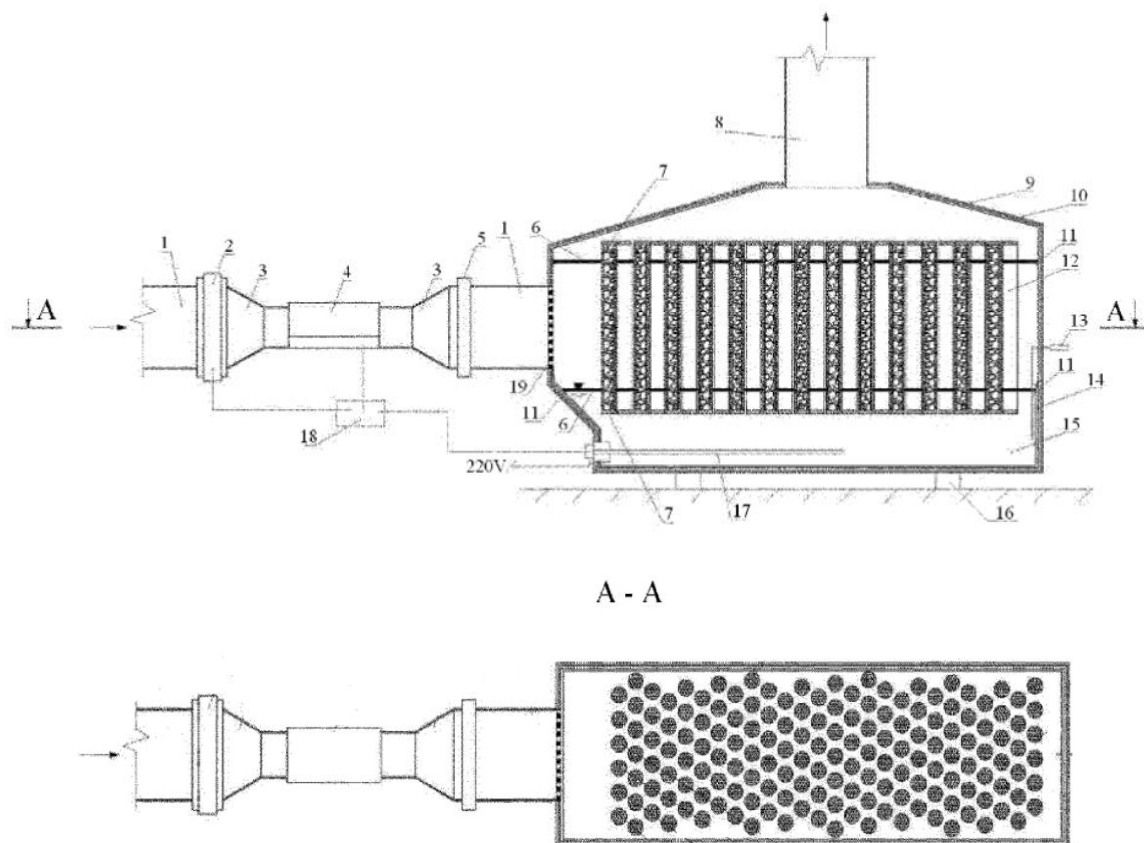


Obr. 1.9. Biofiltr na čištění odpadní vody nebo plynu

1 – biofiltr, 2 – skříň, 10 – přívod plynu, 12 – přívod vody, 14, 15 – ventily, 16 – výstup vody, 18 – výstup plynu, 20 – otvory pro přístup dovnitř, 26 – distributor plynu, 32 – distributor vody, 38 (46, 48, 50, 52, 54) – filtrační náplň, 40 – vrstva kamenů

Biofiltr s kapilárním zvlhčováním

Další možnou variantou je biofiltr s kapilárním zvlhčováním filtrační náplně, který popisuje patent číslo EP 2826543 A1. Filtrační náplň je u tohoto zařízení v děrovaných, případně porézních trubkách (průměr 20 mm), jež jsou umístěny vertikálně vedle sebe a uchyceny nalisováním do dvou plechů nahoře a dole. Trubky jsou naplněny dřevěnou štěpkou nebo granulemi aktivního uhlí, které jsou smíchány se speciálně tepelně upraveným dřevem (poměr 10:1). Vzdálenost mezi jednotlivými trubkami je 1–2 mm a jsou ponořeny z 1/3 do aktivované kapaliny. Tímto uspořádáním dochází ke kapilárnímu zvlhčování. Experimentálně bylo zjištěno, že při takovémto ponoření dojde ke zvlhčení celé vrstvy. Hlavní výhodou je tedy snížení provozních nákladů, neboť není třeba dodávat energii na zvlhčovací systém. Také není riziko vypláchnutí mikroorganismů přílišným zkrápěním. Problém je, že i přes malou vzdálenost mezi trubkami vzduch uniká pryč mezi nimi, což způsobuje malou účinnost čištění.

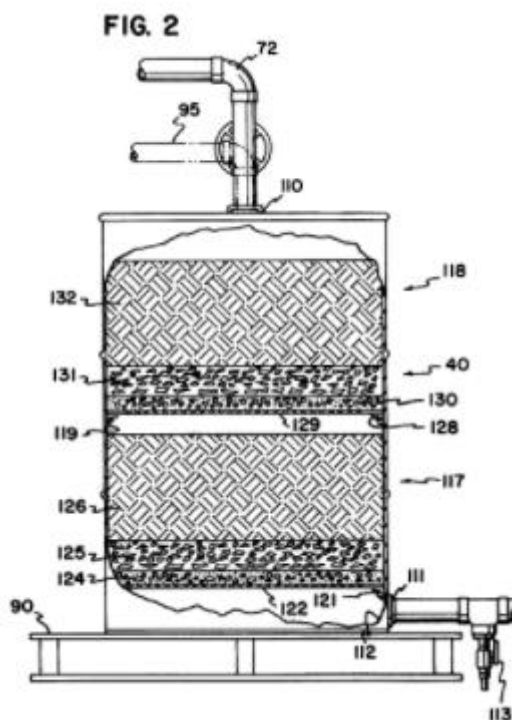


Obr. 1.10. Biofiltr s kapilárním zvlhčováním

1 – vzduchový kanál, 2 – ventilátor, 3 – konektor vzduchového kanálu, 4 – ohřev vzduchu, 5 – ventil, 6 – těsnící plechy, 7 – mřížka na konci trubek, 8 – odvod čistého vzduchu, 9 – tělo biofiltru, 10 – tepelná izolace, 11 – upínací prvky těsnících fólií, 12 – trubka s náplní, 13 – teplotní čidlo, 14 – vodní nádrž, 15 – voda, 16 – nosná konstrukce, 17 – topné články s termostatem, 18 – ovládací panel, 19 – síto

Biofiltr s tokem shora dolů

Rád bych ještě zmínil patent U.S. 5 869 323 A, který se liší od běžných biofiltrů tím, že proud znečištěného vzduchu proudí shora dolů, což minimalizuje možnost vzniku vzduchových komínů a úletu filtrační náplně s vyčištěným vzduchem. Další výhodou je usnadnění zvlhčování vodou s živinami. Tok je zajištěn podtlakovou metodou (vakuově). Tento způsob snižuje nároky na těsnost zařízení, neboť znečištěný vzduch neuniká mezírkami, ale může být pouze přisáván vzduch z okolí.

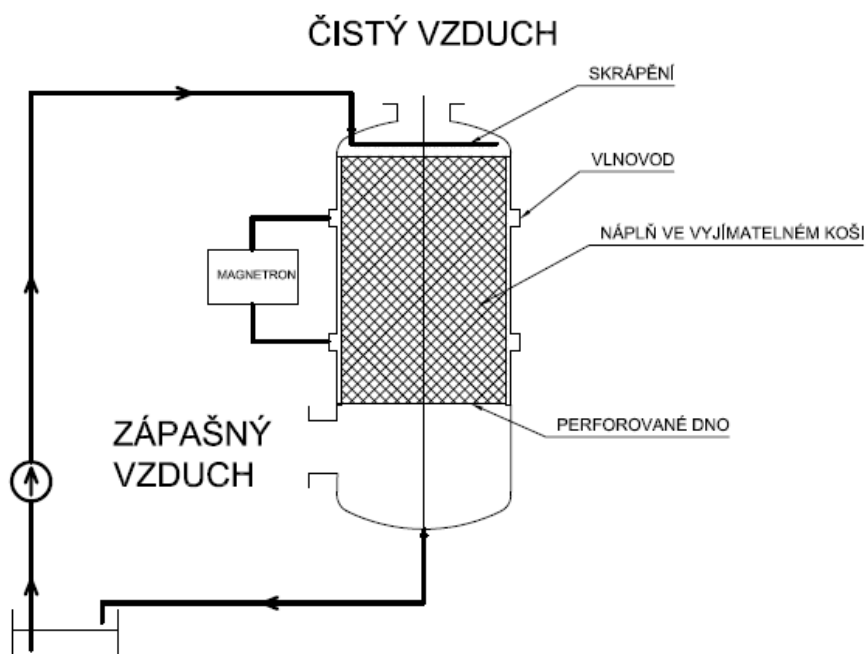


Obr. 1.11. Biofiltr s tokem shora dolů

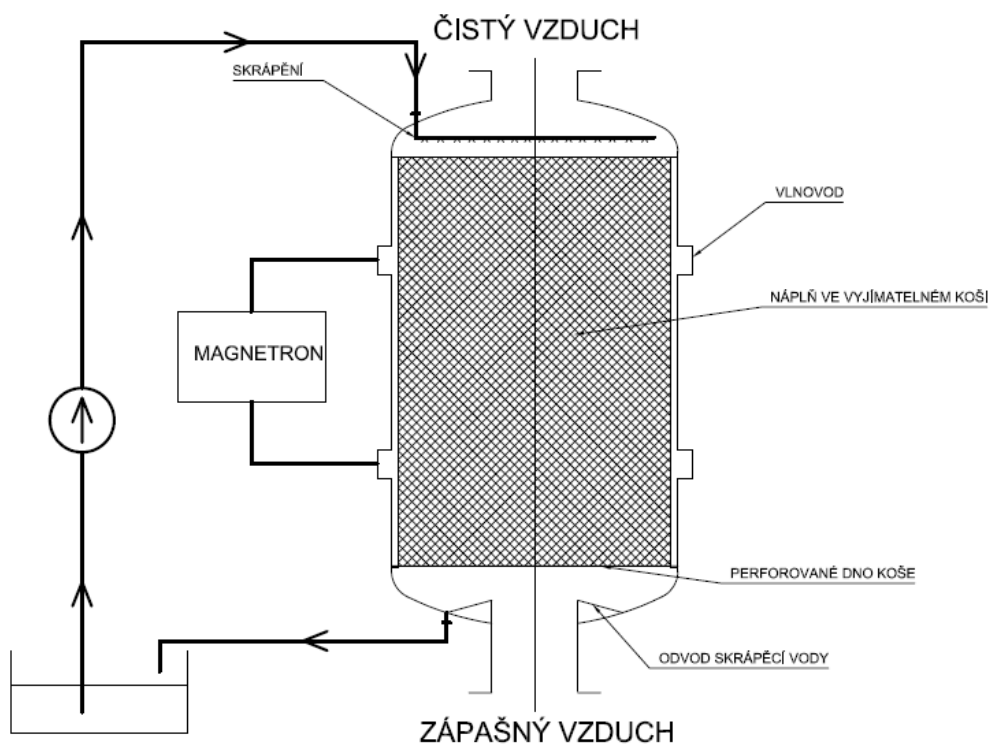
72 – vstup vzduchu, 95 – přívod vody a živin, 111 – výstup vzduchu, 113 – odtok nashromážděné vody, 117, 118 – horní a spodní vrsvené lože, 119 – volný prostor (zabraňuje vzniku komínu přes celé lože), 122, 129 – porézní síto, 124, 130 – vrstva kamenů, 125, 131 – dřevěná štěpka s hlínou, 126, 132 – směs rašeliny, ornice, vermikulitu a kůry

1.3.3 Ideové schéma

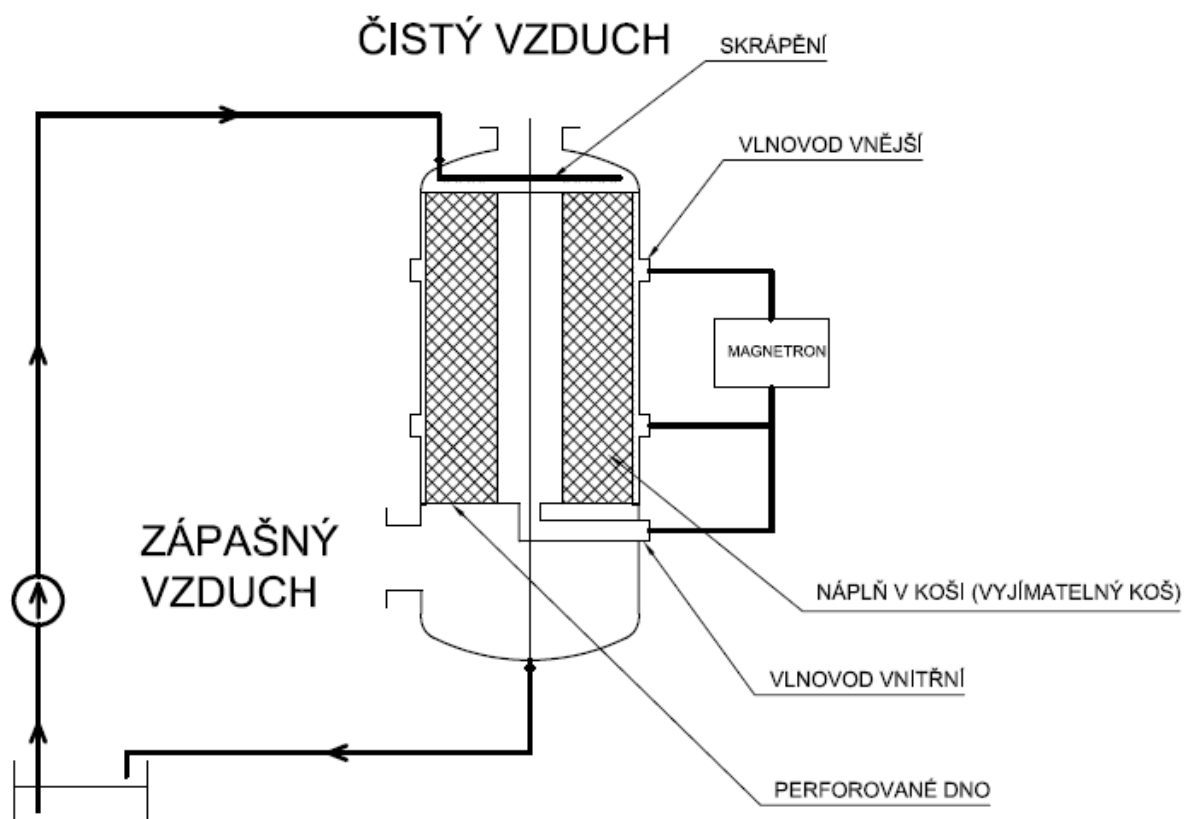
Od firmy CHEMCOMEX jsem obdržel ideová schémata biofiltrů, na kterých můžeme vidět představu o konečném laboratorním zařízení. Můj návrh se tedy bude odvíjet od následujících obrázků.



Obr. 1.12. Ideové schéma biofiltru 1 (CHEMCOMEX, 2017)



Obr. 1.13. Ideové schéma biofiltru 2 (CHEMCOMEX, 2017)



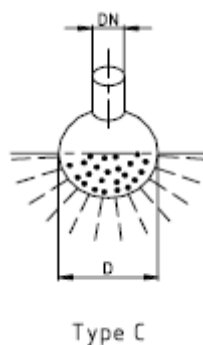
Obr. 1.14. Ideové schéma biofiltru 3 (CHEMCOMEX, 2017)

1.3.4 Rovnoměrný nátok

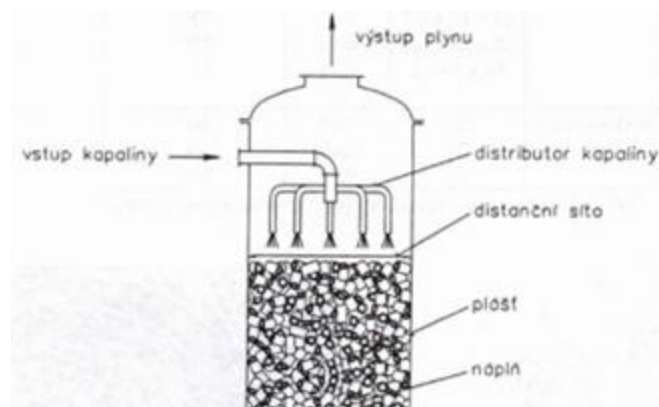
Pro správnou funkčnost biofiltru je důležitý rovnoměrný nátok kapaliny a plynu. Pokud toto pravidlo nedodržíme, vede to ke špatné funkčnosti zařízení. Jestliže budeme špatně distribuovat vzduch, vzniknou v loži místa, kde bude nadbytek živin (polutantů) pro mikroorganismy. Ty se přemnoží a může dojít k ucpávání těchto míst. Naopak v místech, kde nebude proudit vzduch, dojde k úmrtí bio-flóry a nefunkčnosti odbourávání. Špatný nátok vody je příčinou vzniku příliš vlhkých a suchých míst. Tento stav je opět z hlediska účinnosti nežádoucí. A konečně tyto problémy vedou ke vzniku vzduchových komínů. Znečištěný vzduch pak prochází těmito škvírami, které nekladou odpor průtoku a tím se sníží i doba zdržení. Biofiltr se stává nefunkčním. Abychom těmto stavům zabránili uvádím následující možnosti řešení.

Rovnoměrný nátok kapaliny

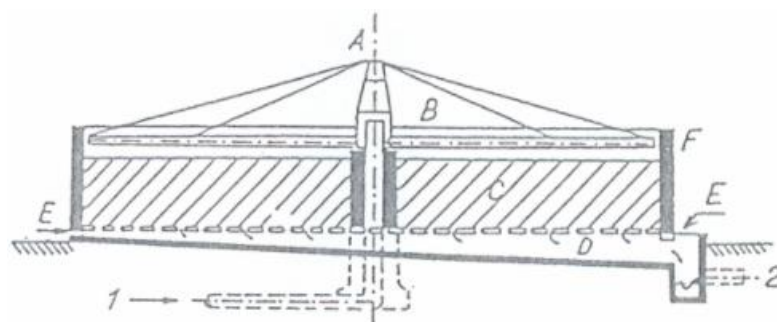
Typ zkrápění lože závisí na velikosti zařízení. Často jsem se setkal s různě tvarovanými nebo větvenými děrovanými trubkami (obr. 1.9.). Ty jsou uspořádány tak, aby zakrývaly co největší část povrchu lože. Je třeba dbát na to, aby se kapalina dostala do všech konců skrápěcí aparatury. Další možností je použít sprchovací koule (obr. 1.15.). Jsou schopny rozstříknout kapalinu pod daným úhlem. Tento způsob se však hodí pro válcová zařízení omezeného průměru. Jinou možností je distributor kapaliny (obr. 1.16.). Jedná se o rozvětvená ramena, na jejichž koncích jsou sprchovací hlavice. Pro velké zařízení se využívá rotační rozprašovač (obr. 1.17.), který má dle potřeby počet ramen.



Obr. 1.15. Sprchovací koule (firma ARMAT spol. s r.o.)



Obr. 1.16. Distributor kapaliny (Hoffman)



Obr. 1.17. Segnerovo kolo (Biologické metody zpracování odpadů)

Rovnoměrný nátok plynu

Jednou z možností, jak dosáhnout rovnoměrné distribuce je použít rozvětvený trubkový systém, který přivádí vzduch pod celé lože (obr. 1.18.). Tento způsob se využíval převážně u velkoplošných biofiltrů. Dnes se stavějí menší zařízení. Odpadní plyn je přiváděn pod lože, kde bývá distribuční prostor. U velmi malých zařízení stačí pouze správné usměrnění vstupujícího toku do míst pod ložem. Pokud se jedná o větší zařízení instalují se různé vestavby a narážky pro usměrnění toku.



Obr. 1.18. Rozvod plynu v půdním biofiltru (Marada, 2017)

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 CÍLE NÁVRHU

Úkolem praktické části této diplomové práce je vyhodnotit poznatky z teoretické části v předchozím textu a na jejich základě navrhnout modulární laboratorní jednotku pro stanovování hydraulických a tepelných procesních charakteristik dvoufázového toku s aplikací na biofiltr. Základním požadavkem je variabilita celého zařízení v jednotlivých sekcích, tak aby bylo možné nasimulovat a vyhodnotit široké spektrum variant zapojení a provozování biofiltrů. Tato komplexní jednotka bude vyrobena a následně používána ve školní laboratoři.

2.1.1 Požadavky na design

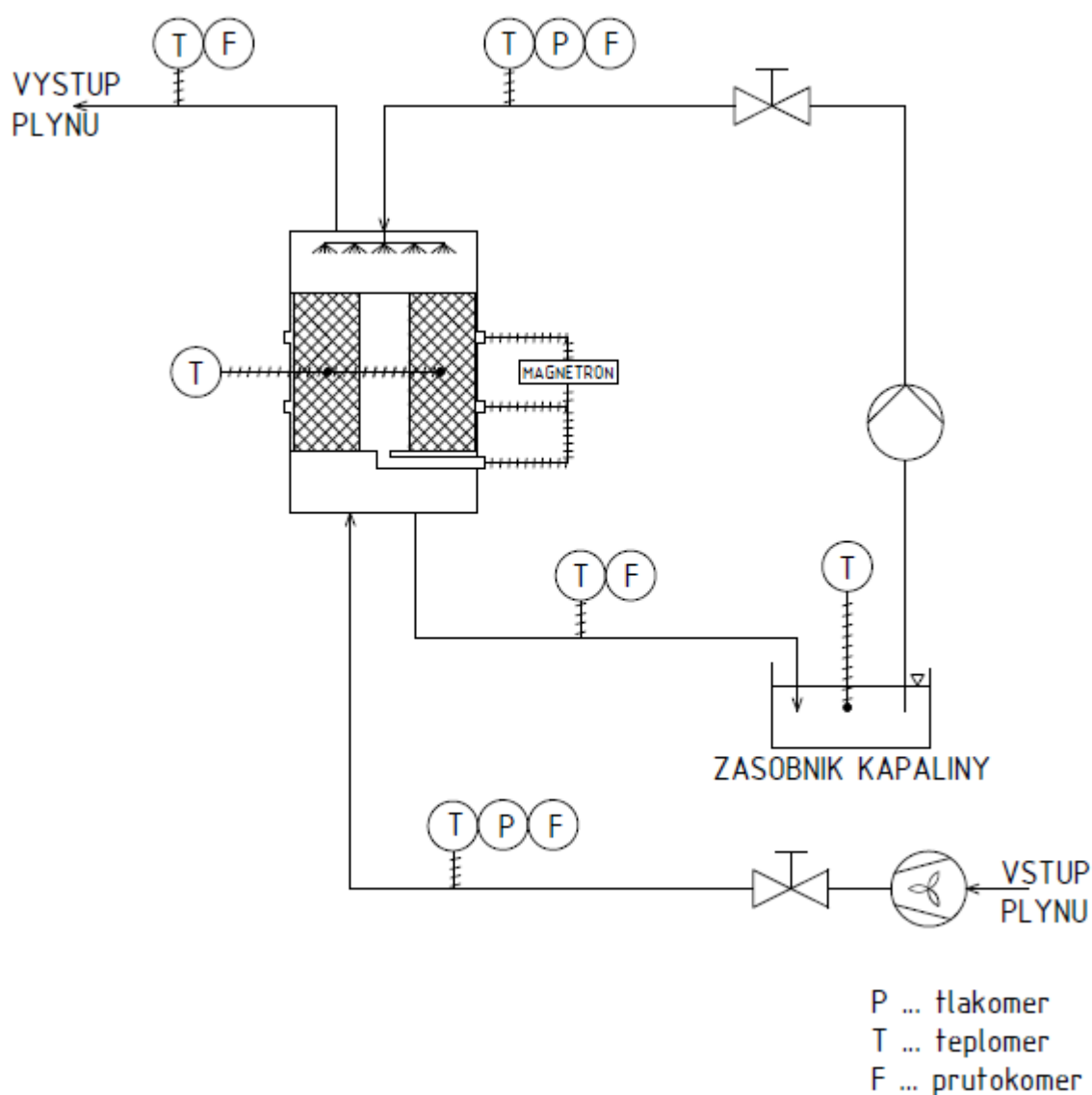
- Válcový reaktor o průměru 150-200 mm.
- $H/D = 1,5$ (poměr výšky reaktoru ku průměru).
- Možnost variant plný válec nebo s mezikružím pro magnetron (mikrovlnný ohřev).
- Vytvoření rovnoměrného toku kapaliny a plynu na nátok, tak aby se blížil pístovému toku.
- Odnímatelný topný pás na válcovou část.
- Termočlánky typu K pro měření rozložení teploty v průřezu reaktoru (umístění přibližně v polovině výšky reaktoru).
- Měření tlakové ztráty kapaliny a plynu.
- Měření teploty na vstupu a výstupu kapaliny a plynu.
- Instalace průtokoměrů a škrticích ventilů pro oba proudy.
- Možnost zatěžování pro simulaci stárnutí vrstvy.
- Maximální průtok plynu vůči kapalině je 2/1.

2.2 PROUDOVÉ TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA

V rámci návrhu základního proudového technologického schématu (PTS) jsem vytvořil tři varianty, které se od sebe liší v jednotlivých komponentech. Základní dělení mezi jednotlivými schématy jsem si vzal typ ohřevu vsázky. Jednotlivé části, jako třeba nátok kapaliny, se mohou mezi sebou kombinovat.

2.2.1 PTS magnetron

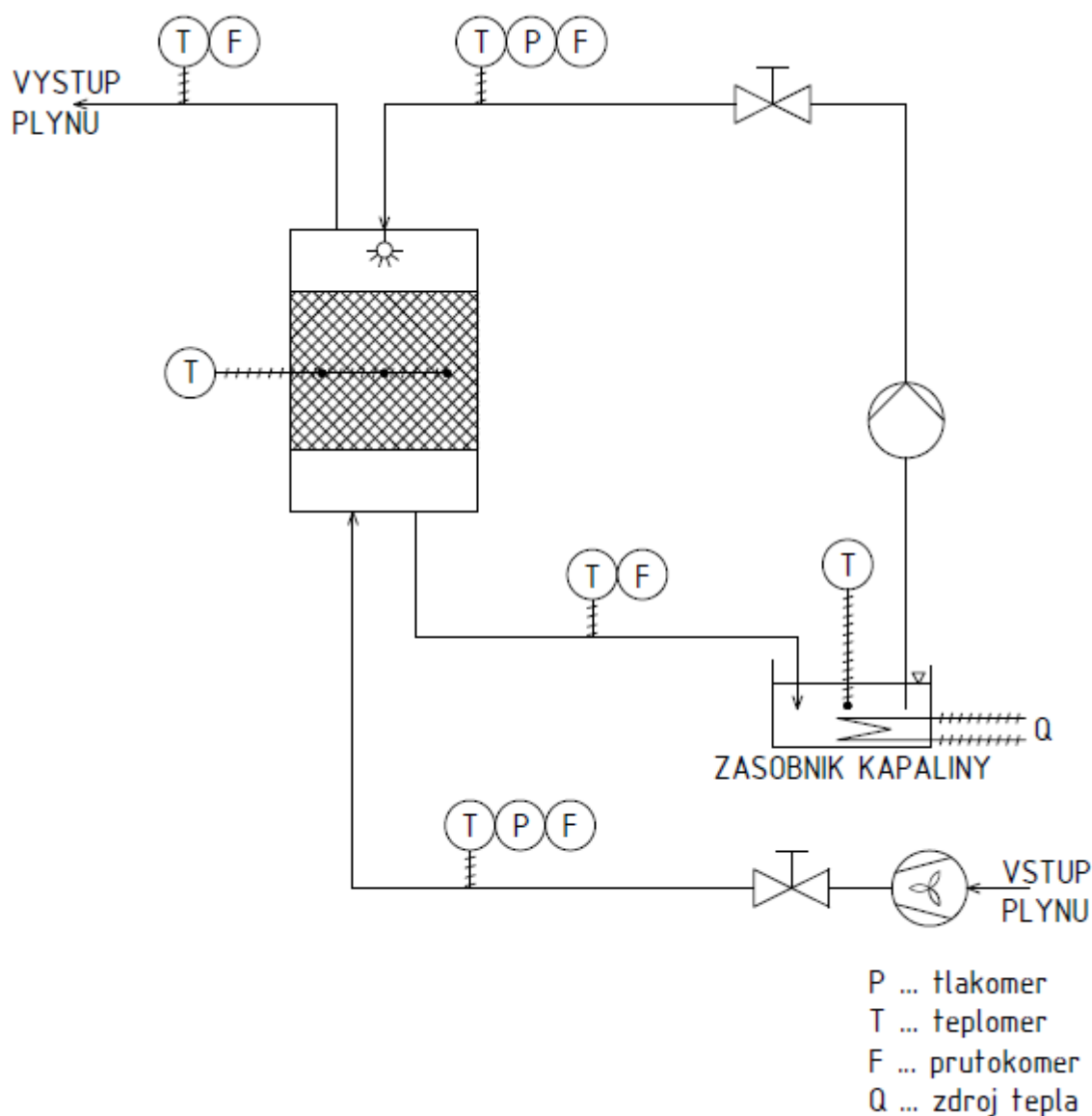
Jak si můžeme všimnout, tak na následujícím PTS se ohřev aktivní vrstvy biofiltru provádí pomocí magnetronu, tedy mikrovlně. Je nutné vytvořit ve středu mezikruží, aby bylo dosaženo rovnoměrného ohřevu vrstvy, neboť mikrovlny mají omezenou prostupnost. Voda cirkuluje přes zásobník kapaliny. Na lože je rovnoměrně rozstříkována pomocí stočené děrované trubky. Teplota je měřena v průřezu vrstvy, na vstupech a výstupech obou proudů a také je kontrolována v zásobníku. Také je měřena tlaková ztráta a průtok obou proudů, ty jsou regulovány škrticími ventily.



Obr. 2.1. PTS magnetron

2.2.2 PTS vnější ohřev vody

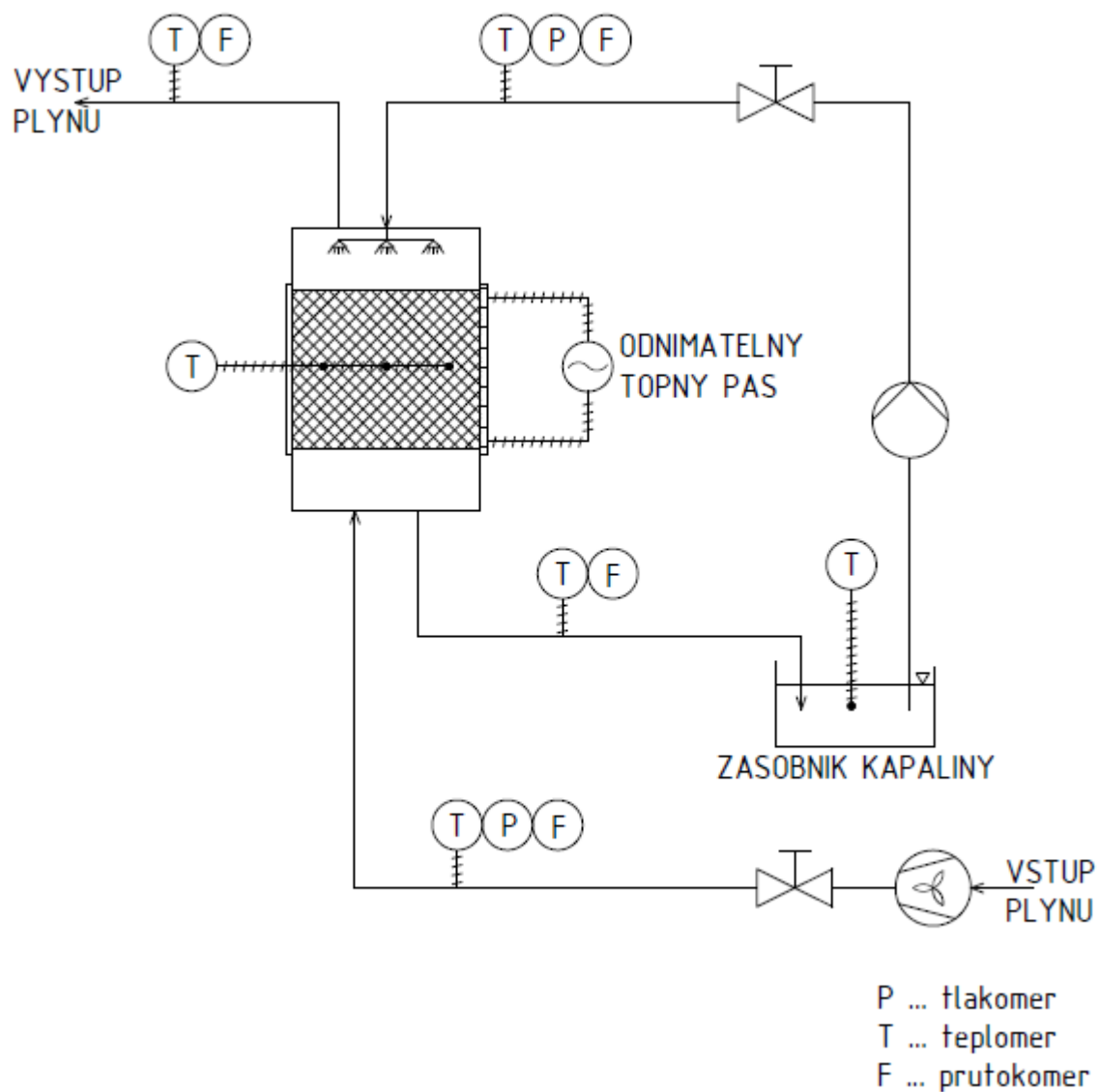
Další možností je ohřev sprchovací vody ve vnějším zásobníku kapaliny a touto teplou vodou sprchovat lože. Zahřívání je možné provést například pomocí topné spirály či jiným dostupným zdrojem. Rozstřík vody zajišťuje sprchovací koule. Měření a regulace je prováděna stejným způsobem jako u předchozí varianty.



Obr. 2.2. PTS vnější ohřev vody

2.2.3 PTS topný pás

Tato třetí varianta PTS je vybavena ohřevem pomocí odnímatelného topného pásu na vnějším povrchu pláště reaktoru. Rozstřík vody je proveden čtyřmi sprchovacími hlavicemi uspořádanými do kříže. Ostatní parametry měření a regulace jsou obdobné jako předešlé PTS.



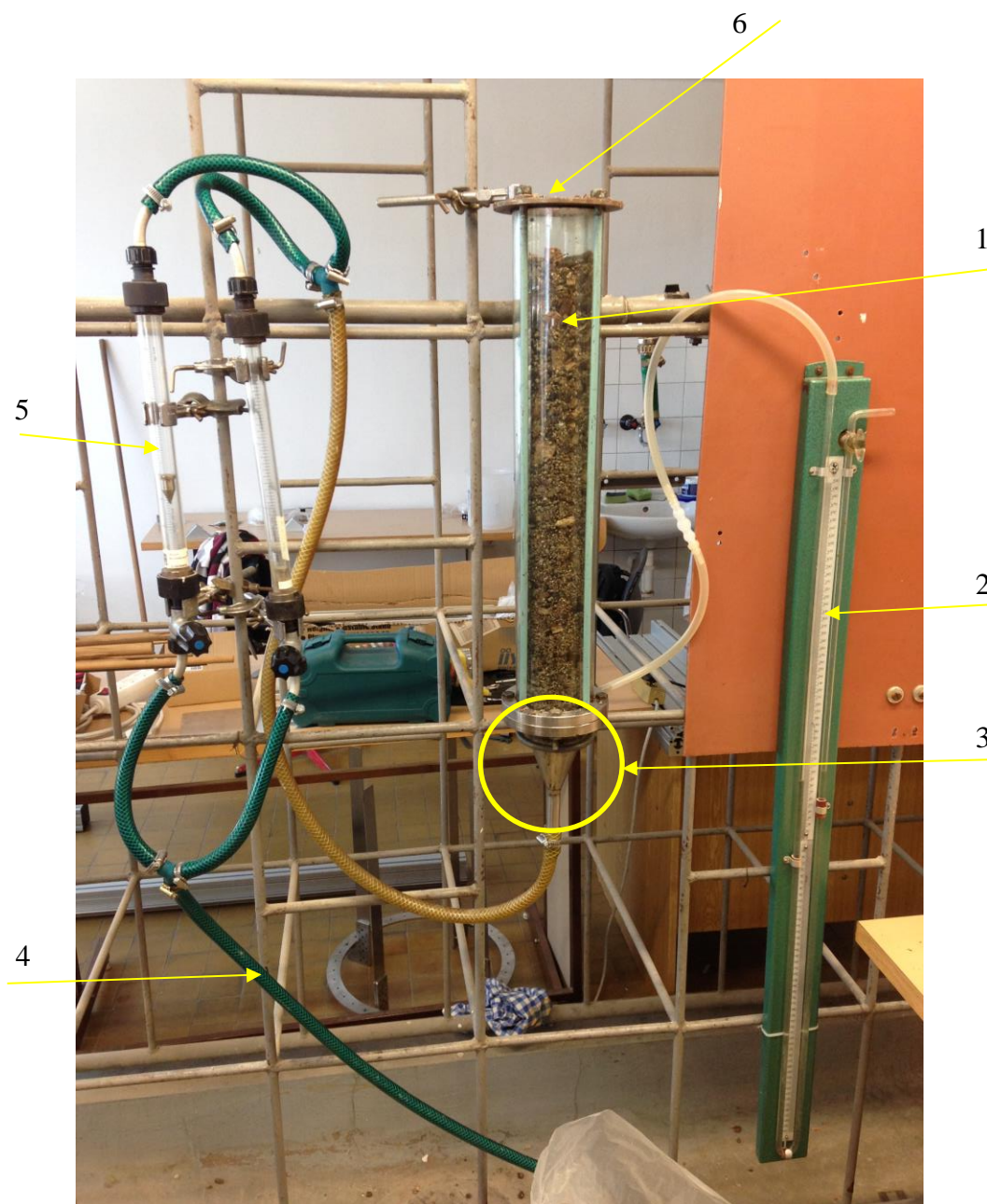
Obr. 2.3. PTS topný pás

2.3 EXPERIMENTY PRO ZÁKLADNÍ NÁVRH

Pro vytvoření návrhu biofiltrační jednotky bylo třeba určit několik parametrů filtrační vrstvy. Mezi hlavní parametry, které jsem vyhodnotil, patří potřebné průtoky plynů, tlakové ztráty atd. Potřebujeme znát tlakovou ztrátu v závislosti na výšce vrstvy a jejím stárnutí. Měření proběhlo v laboratoři na provizorní jednotce, která představovala zjednodušený biofiltr. K vyhodnocení je třeba mít základní znalosti z teorie průtoku porézní vrstvou. Tyto poznatky jsem shrnul v teoretické části této práce (kap. 1.2) a aplikoval na experimenty.

2.3.1 Experimentální zařízení

V experimentálním měření došlo k řadě zjednodušení. Stárnutí vrstvy (sesednutí) jsem vytvářel stlačením rukou. Nedocházelo ke skrápění (jednalo se tedy o jednofázový průtok porézní vrstvou), ale proměřoval jsem suchou a 24 hodin namočenou vrstvu ve vodě. Abychom dosáhli potřebného měřitelného průtoku, zařadil jsem paralelně dva průtokoměry. Jako zdroj tlakového vzduchu jsem použil laboratorní rozvod vzduchu.



Obr. 2.4. Experimentální soustava

1 – filtrační vrstva, 2 – U-manometr, 3 – vstup vzduchu, 4 – přívod tlakového vzduchu,
5 – průtokoměr vzduchu, 6 – výstup vzduchu do atmosféry

Specifikace měření

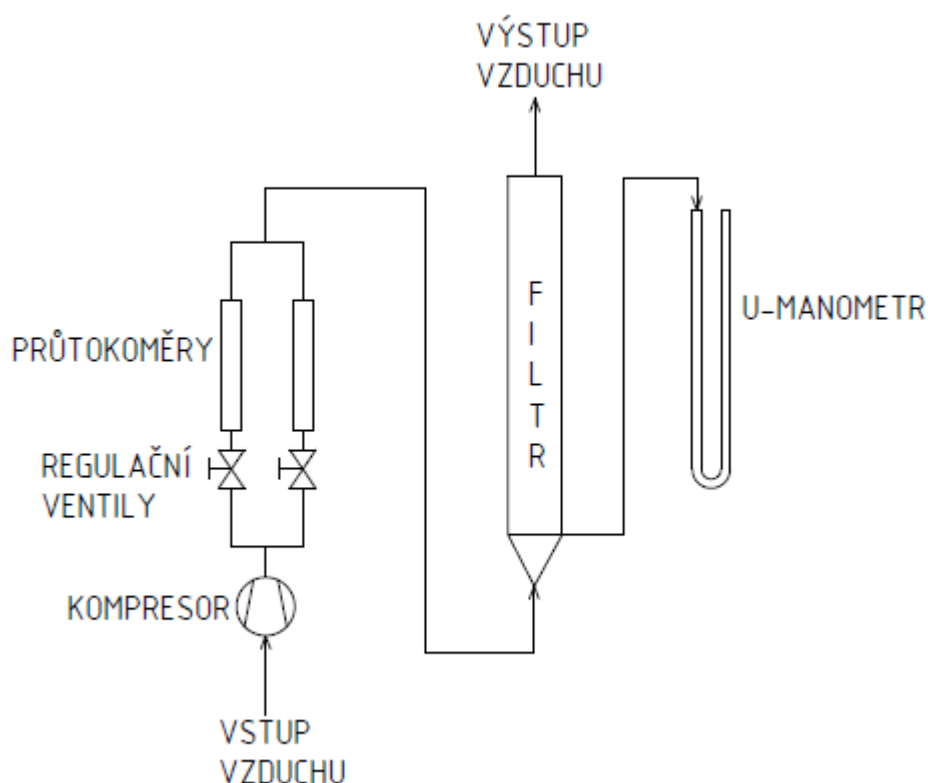
Filtrační vrstva – je tvořena směsí několika materiálů, jejíž specifikace je probrána v následující kapitole (2.3.2). Průměr reaktoru je 84 mm a maximální výška filtrační vrstvy 550 mm.

U-manometr – slouží k měření tlakové ztráty průchodem lože pomocí rozdílu výšky hladin v U-trubici. Tlaková ztráta je měřena u vstupu vzduchu do vrstvy vůči atmosférickému tlaku.

Vstup vzduchu – je přiváděn hrdlem do kuželového dna, kde dochází k distribuci vzduchu do celého průřezu. Mezi dnem a vrstvou je nosné síto, jenž umožňuje průchod vzduchu.

Přívod tlakového vzduchu – tlakový vzduch je tvořen pomocí laboratorního kompresoru.

Průtokoměr vzduchu – jsou zde zařazeny paralelně dva plovákové průtokoměry o průtocích 8000 l.h^{-1} a 3200 l.h^{-1} , což umožňuje maximální průtok 11200 l.h^{-1} . Průtokoměry jsou opatřeny regulačními ventily pro nastavování průtoku.

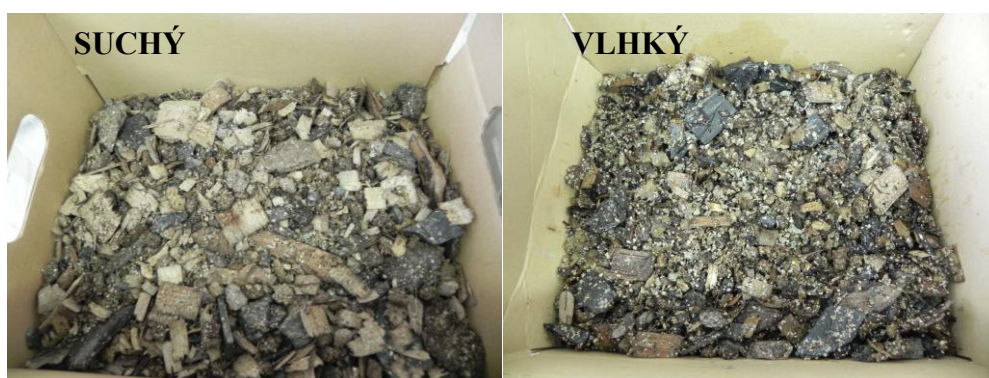


Obr. 2.5. Schéma zapojení experimentální soustavy

2.3.2 Materiál filtračního lože

Náplň filtračního lože jsem obdržel od Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, které materiál dodala firma CHEMCOMEX. Tento materiál je velmi nehomogenní (polydisperzní), to znamená že jednotlivé složky mají velmi rozdílnou velikost. Určovat u takovéto směsi frakční složení je komplikované a pro naše účely zbytečně složitá operace. Pro experiment se omezíme na odhadnutý charakteristický rozměr částice $D_p = 15 \text{ mm}$. Důležitým parametrem pro určení charakteristiky vrstvy a následně návrhu modelu je též poróznost. Jejímu určení se věnuje následující podkapitola.

Již bylo zmíněno, že měření tlakové ztráty v závislosti na průtoku bylo prováděno na suchém materiálu a 24 hodin namočeném materiálu.



Obr. 2.6. Materiál filtračního lože

Jednotlivé složky

Směs je tvořena řadou materiálů, které jsou smíchány objemovým způsobem. Od každé složky je vložen jeden díl.

- Mulč
- Kůra
- Hobliny
- Kukuřice
- Dřevěná štěpka
- Vermikulit
- Zeolit

2.3.3 Porózita náplně

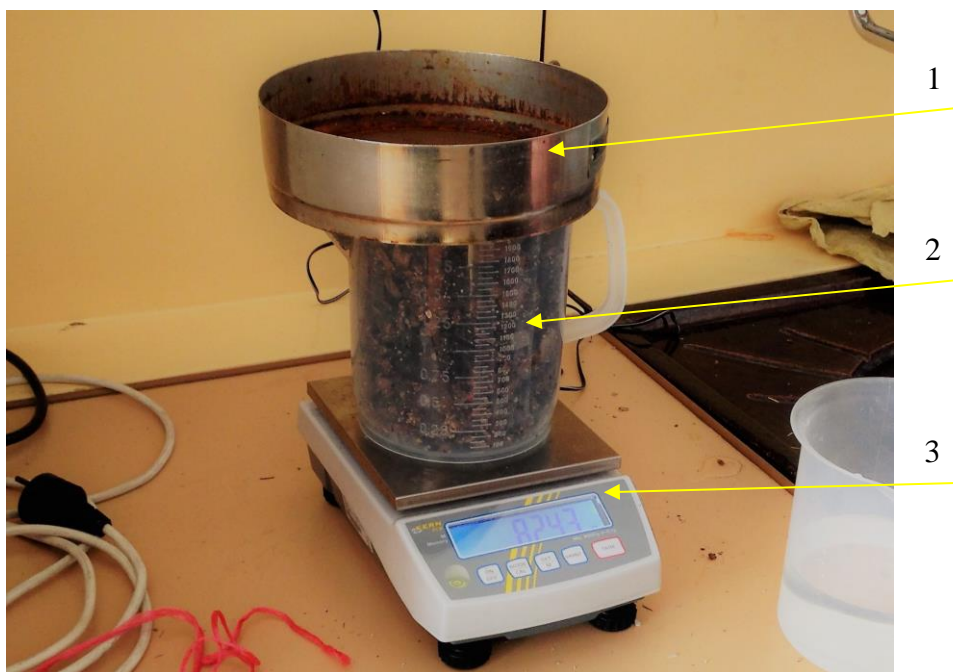
Ve vzorcích pro výpočet tlakové ztráty (1.2-20) a Re' (1.2-21), které jsou potřebné pro návrh zařízení, hraje důležitou roli porózita vrstvy. Ta lze určit různými způsoby. Pro můj případ jsem zvolil metodu nasycení kapalinou, která nevyžaduje složité zařízení. Další její výhodou je její jednoduchost, snadné vyhodnocení. Kromě namočení vzorku nepřináší jeho znehodnocení. Zakládá se na hmotnosti nasycené vrstvy vodou, jež se rovná hmotnosti suché vrstvy a hmotnosti vody potřebné pro nasycení. Předpokládal jsem nulovou nasákavost materiálu.

$$m_{sat} = m_{dry} + m_{water} \quad (2.3-1)$$

Postup měření

Nejprve jsem určil objem nádoby na měření porozity. Poté jsem nádobu naplnil filtračním ložem a určil hmotnost. Následně jsem ji zalil vodou a naměřil hmotnost nasycené vrstvy. Z těchto dvou hmotností se dá dopočíst hmotnost vody, ze které se určí její objem, jenž se rovná objemu volného prostoru.

Měřicí aparatura



Obr. 2.7. Měřicí aparatura porozity

1- zatěžovací síť, 2- nádoba s náplní, 3- elektronická váha (KERN PCB, přesnost 0,1 g)

Podmínky v laboratoři

$$T_{vz} = 22,6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{teplota vzduchu})$$

$$p_{vz} = 100,02 \text{ kPa} \quad (\text{tlak vzduchu})$$

Vlastnosti vody

$$T_{H_2O} = 18,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{teplota vody})$$

$$\rho_{H_2O} (18,3 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 998,56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad (\text{hustota vody})$$

Objem nádoby V_n

Určí se přes hmotnost vody, která se do nádoby vejde.

$$m_{pr.n} = 0,141 \text{ kg} \quad (\text{hmotnost prázdné nádoby})$$

$$m_{pl.n} = 2,369 \text{ kg} \quad (\text{hmotnost plné nádoby})$$

$$V_n = \frac{m_{pl.n} - m_{pr.n}}{\rho_{H_2O}} = \frac{2,369 - 0,141}{998,56} = 2,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.3-2)$$

Suchý materiál

Naměřené hodnoty

$$m_{dry} = 0,718 \text{ kg} \quad (\text{hmotnost suché vrstvy})$$

$$m_{sat} = 2,070 \text{ kg} \quad (\text{hmotnost nasycené vrstvy})$$

Hmotnost vody

$$m_{water} = m_{sat} - m_{dry} = 2,070 - 0,718 = 1,352 \text{ kg} \quad (2.3-3)$$

Objem vody V_{water} = Objem pórů V_{por}

$$V_{water} = V_{por} = \frac{m_{water}}{\rho_{H_2O}} = \frac{1,352}{998,56} = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.3-4)$$

Poróznost suché náplně

$$\varepsilon = \frac{V_{por}}{V_n} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{2,23 \cdot 10^{-3}} = 0,607 \quad (2.3-5)$$

Mokrý materiál

Naměřené hodnoty

$m_{dry} = 0,824 \text{ kg}$ (hmotnost vlhké vrstvy)

$m_{sat} = 2,140 \text{ kg}$ (hmotnost nasycené vrstvy)

Hmotnost vody

$$m_{water} = m_{sat} - m_{dry} = 2,140 - 0,824 = 1,315 \text{ kg} \quad (2.3-6)$$

Objem vody V_{water} = Objem pórů V_{por}

$$V_{water} = V_{por} = \frac{m_{water}}{\rho_{H_2O}} = \frac{1,315}{998,56} = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.3-7)$$

Poróznost vlhké náplně

$$\varepsilon = \frac{V_{por}}{V_n} = \frac{1,32 \cdot 10^{-3}}{2,23 \cdot 10^{-3}} = 0,590 \quad (2.3-8)$$

Závěr

Při vyhodnocování měření jsem dospěl k poróznosti $\varepsilon = 0,607$ pro suchý materiál a $\varepsilon = 0,59$ pro vlhký materiál. Pokud budu uvažovat chybu měření 5 % dospěji k hodnotám $\varepsilon = 0,607 \pm 0,03$ a $\varepsilon = 0,59 \pm 0,03$. Rozdíl v poróznosti mezi suchou a vlhkou vrstvou je menší než uvažovaná chyba měření. Proto jsem určil poróznost vrstvy jako:

$$\varepsilon = 0,6$$

2.3.4 Tlaková ztráta náplně

Důležitým parametrem, který charakterizuje vrstvu (dle kapitola 1.1.1), je její tlaková ztráta v závislosti na její výšce a velikosti průtoku plynu. Pro scale-up je zapotřebí navrhnout bezrozměrný vztah $\lambda' = f_{ce}(Re')$. Z něho následně navrhnu parametry finálního zařízení. Pro mé účely postačí změřit tlakovou ztrátu při jednofázovém průtoku plynu porézní vrstvou (viz. obr. 2.4.).

Způsob výpočtu vychází z řešeršní částí o průtoku porézní vrstvou.

Postup měření

V laboratorní místnosti byla postavena experimentální jednotka (obr. 2.4.), na které proběhla základní měření. Nejprve jsem nasypal vrstvu náplně do filtrační nádoby, kterou jsem rukou volně stlačil. Určil jsem výšku této stlačené vrstvy. Poté jsem regulačním ventilem pouštěl stlačený vzduch skrz lože, přičemž jsem nastavoval průtok plynu od 3000 do 11000 l.h⁻¹. Množství plynu jsem měřil průtokoměrem. Na u-manometru, který byl připojen u vstupu plynu (dno filtru), jsem odečítal rozdíl hladin oproti atmosférickému tlaku. Z rozdílu jsem vypočetl tlakovou ztrátu.

Tento celý postup jsem pětkrát opakoval pro suché lože a následně i pro lože 24 hodin namočeném ve vodě.

Suchý materiál

Podmínky v laboratoři

$t_{H_2O} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$	(teplota vody u-manometru)
$\rho_{H_2O} (21\text{ }^{\circ}\text{C}) = 998\text{ kg.m}^{-3}$	(hustota vody)
$t_{vz} = 15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	(teplota vzduchu)
$p_{vz} = 97,87\text{ kPa}$	(tlak vzduchu)
$\rho_{vz} (15\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1,23\text{ kg.m}^{-3}$	(hustota vzduchu)
$\mu_{vz} (15,5\text{ }^{\circ}\text{C}) = 17,97 \cdot 10^{-6}\text{ Pa.s}$	(dynamická viskozita vzduchu)

Další parametry měření

$D = 0,084\text{ m}$	(průměr reaktoru)
$g = 9,81\text{ m.s}^{-2}$	(gravitační zrychlení)
$D_p = 0,015\text{ m}$	(charakteristický rozměr částic náplně)
$\varepsilon = 0,6$	(poróznost náplně)

Naměřené a vypočítané hodnoty

SUCHÝ MATERIÁL

Měření č.: 1

Výška vrstvy h 530 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	$\Delta p/h$ [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
2900	94	105	11	107,69	203,20	8,06E-04	0,145	247,81	42,37	832,63	7846,46
5000	87	113	26	254,55	480,28	1,39E-03	0,251	427,26	33,69	1435,58	6238,93
6800	78	121	43	420,99	794,31	1,89E-03	0,341	581,07	30,12	1952,38	5578,63
9000	65	133	68	665,75	1256,12	2,50E-03	0,451	769,06	27,20	2584,04	5036,17
11000	53	145	92	900,71	1699,46	3,06E-03	0,551	939,96	24,63	3158,27	4561,20

Měření č. 2

Výška vrstvy h 505 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	$\Delta p/h$ [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	94	106	12	117,48	232,64	8,33E-04	0,150	256,35	45,33	861,35	8394,60
5000	86	112	26	254,55	504,06	1,39E-03	0,251	427,26	35,36	1435,58	6547,79
7000	78	121	43	420,99	833,64	1,94E-03	0,351	598,16	29,84	2009,81	5525,02
9000	66	132	66	646,17	1279,53	2,50E-03	0,451	769,06	27,70	2584,04	5130,03
10850	54	144	90	881,13	1744,82	3,01E-03	0,544	927,14	25,99	3115,20	4813,32

Měření č. 3

Výška vrstvy h 525 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	$\Delta p/h$ [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	94	107	13	127,27	242,43	8,33E-04	0,150	256,35	47,24	861,35	8747,71
5000	86	114	28	274,13	522,15	1,39E-03	0,251	427,26	36,63	1435,58	6782,84
7000	75	123	48	469,94	895,12	1,94E-03	0,351	598,16	32,04	2009,81	5932,51
8900	63	136	73	714,70	1361,33	2,47E-03	0,446	760,51	30,14	2555,33	5581,31
11000	49	150	101	988,83	1883,48	3,06E-03	0,551	939,96	27,30	3158,27	5055,10

Měření č. 4

Výška vrstvy h 520 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	$\Delta p/h$ [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	93	106	13	127,27	244,76	8,33E-04	0,150	256,35	47,69	861,35	8831,82
5000	85	114	29	283,92	546,00	1,39E-03	0,251	427,26	38,30	1435,58	7092,63
7100	74	124	50	489,52	941,38	1,97E-03	0,356	606,70	32,75	2038,52	6064,61
8850	63	136	73	714,70	1374,42	2,46E-03	0,444	756,24	30,77	2540,97	5698,83
10850	47	150	103	1008,41	1939,25	3,01E-03	0,544	927,14	28,89	3115,20	5349,67

Měření č. 5

Výška vrstvy h 525 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	$\Delta p/h$ [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	94	106	12	117,48	223,78	8,33E-04	0,150	256,35	43,60	861,35	8074,81
5000	86	113	27	264,34	503,51	1,39E-03	0,251	427,26	35,32	1435,58	6540,59
7000	76	123	47	460,15	876,47	1,94E-03	0,351	598,16	31,37	2009,81	5808,92
8750	65	133	68	665,75	1268,09	2,43E-03	0,439	747,70	29,05	2512,26	5378,81
11000	50	148	98	959,46	1827,54	3,06E-03	0,551	939,96	26,49	3158,27	4904,94

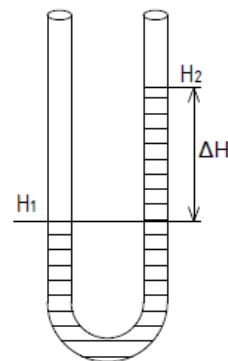
Tab. 2.1. Suchý materiál – tlaková ztráta, naměřené a vypočítané hodnoty

Příklad výpočtu

Pro ilustraci uvedu příklad výpočtu prvního řádku z měření číslo 1.

Naměřené hodnoty

$h = 530 \text{ mm}$	(výška náplně)
$V = 2900 \text{ l.h}^{-1}$	(průtok vzduchu)
$H_1 = 94 \text{ mm}$	(výška hladiny v manometru)
$H_2 = 105 \text{ mm}$	(výška hladiny v manometru)



Obr. 2.8. Schéma U-manometru

Prvním parametrem, který potřebuji dopočítat, je tlaková ztráta průchodem vrstvy Δp . Na manometru odečtu rozdíl hladin $H_2 - H_1$. Ten pak dosadím do výpočtu hydrostatického tlaku.

$$\Delta H = H_2 - H_1 = 105 - 94 = 11 \text{ mm} \quad (2.3-9)$$

$$\Delta p = \Delta H \cdot \rho \cdot g = 0,011 \cdot 998 \cdot 9,81 = 107,69 \text{ Pa} \quad (2.3-10)$$

Pro vyhodnocení primárních naměřených dat, jsem dále určil poměr $\Delta p/h$. Tento zlomek jsem vynesl do grafu jako funkci rychlosti proudění vzduchu u_0 na vstupu do náplně.

Určení $\Delta p/h$

$$\frac{\Delta p}{h} = \frac{107,69}{0,59} = 203,20 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1} \quad (2.3-11)$$

Určení u_0

Převod jednotek průtoku

$$V = 2900 \text{ l.h}^{-1} = 2900 \cdot \frac{10^{-3}}{3600} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 8,06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.3-12)$$

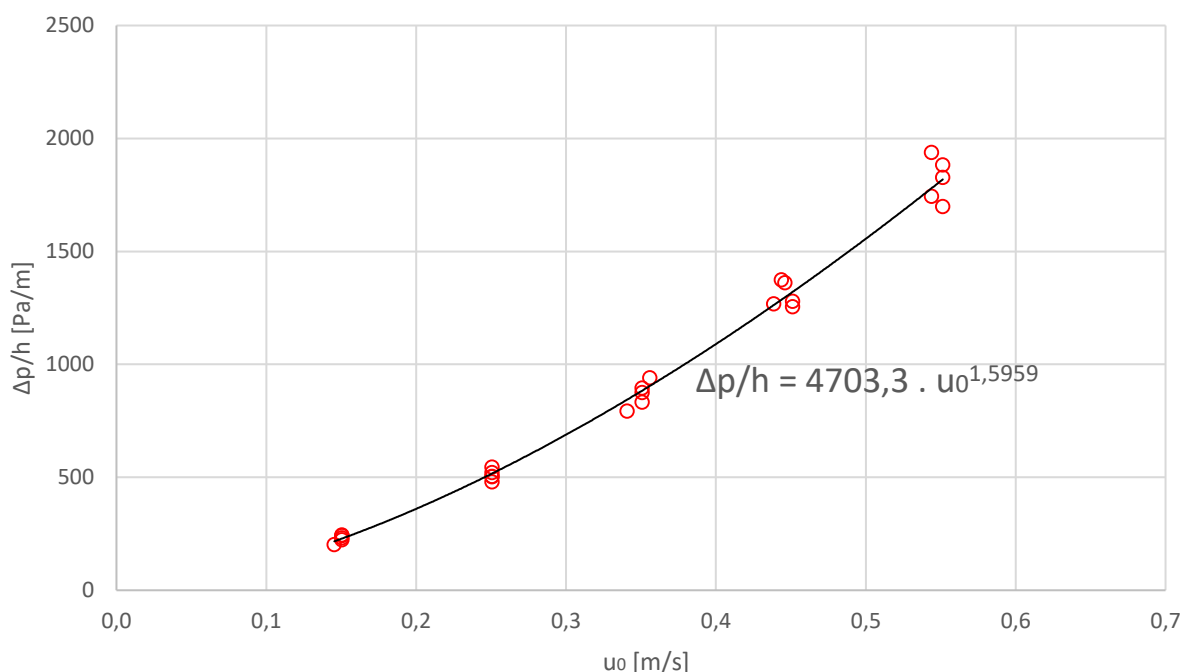
Průřez reaktoru

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,084^2}{4} = 5,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (2.3-13)$$

Rychlost vzduchu

$$V = u_0 \cdot S \rightarrow u_0 = \frac{V}{S} = \frac{8,06 \cdot 10^{-4}}{5,54 \cdot 10^{-3}} = 0,145 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.3-14)$$

Graf primárních naměřených dat



Graf 2.1. Vyhodnocení primárních naměřených dat – suchý materiál

Z grafu lze vyčíst, že výsledky z pěti opakovaných měření se nám mírně rozcházejí s rostoucí rychlostí vzduchu.

Následně jsem výsledné hodnoty převedl na tvar pro návrh experimentálního zařízení a scale-up. K tomu mi poslouží bezrozměrná závislost $\lambda' = f(Re')$. Tento vztah vychází opět z teorie jednofázového toku porézní vrstvou. Re' je Reynoldsovo číslo vztaženo na průtok plynu mezi vrstvou filtru.

Určení Re'

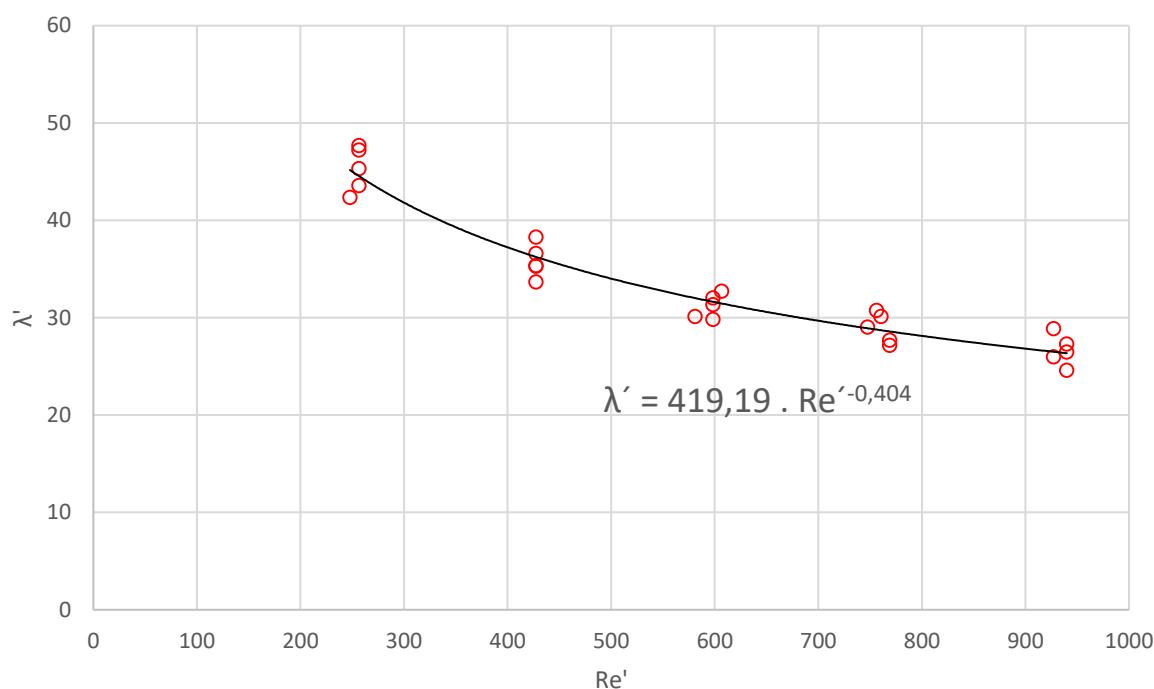
$$Re' = \frac{u_0 \cdot D_p \cdot \rho_{vz}}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_{vz}} = \frac{0,145 \cdot 0,015 \cdot 1,23}{(1 - 0,6) \cdot 17,97 \cdot 10^{-6}} = 247,81 \quad (2.3-15)$$

Určení λ' ($\Delta p = \Delta p_z$)

$$\Delta p_z = \lambda' \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{h}{D_p} \cdot u_0^2 \cdot \rho_{vz} \rightarrow \lambda' \quad (2.3-16)$$

$$\lambda' = \Delta p_z \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{D_p}{h} \cdot \frac{1}{u_0^2 \cdot \rho_{vz}} = 107,69 \cdot \frac{0,6^3}{1 - 0,6} \cdot \frac{0,015}{0,53} \cdot \frac{1}{0,145^2 \cdot 1,23} = 42,37 \quad (2.3-17)$$

Graf ve tvaru pro návrh experimentálního zařízení a scale-up



Graf 2.2. Vyhodnocení ve tvaru pro návrh zařízení – suchý materiál

Tento bezrozměrný graf a jeho rovnici využiji při návrhu zařízení. Výsledné body jsem proložil mocninovou regresní křivkou.

$$\lambda' = 419,19 \cdot Re'^{-0,404} \quad (2.3-18)$$

Graf 2.2. je zatížený chybou, která vzniká nejen při měření, ale i při určování porozity ε a odhadu charakteristického rozměru D_p . Proto uvádím ještě následující graf $R = f(Re)$, který chybu eliminuje a všechny parametry shrnuje do hodnoty R . Re je Reynoldsovo číslo mimo vrstevného proudění.

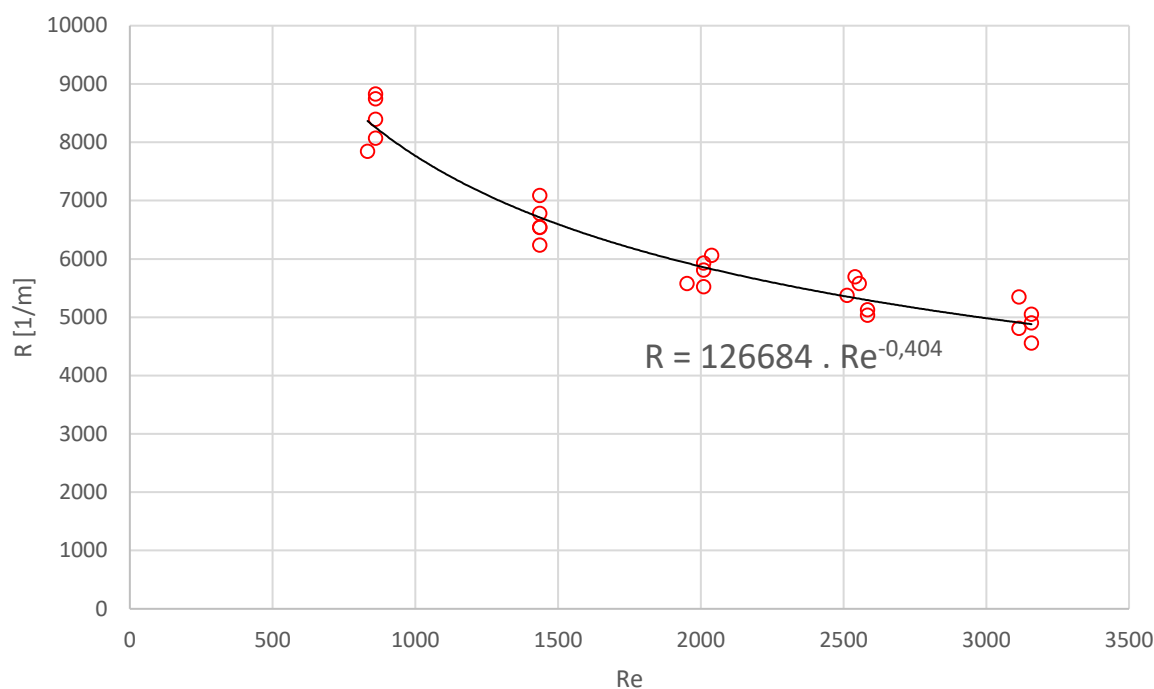
Určení Re

$$Re = \frac{u_0 \cdot D \cdot \rho_{vz}}{\mu_{vz}} = \frac{0,145 \cdot 0,084 \cdot 1,23}{17,97 \cdot 10^{-6}} = 832,63 \quad (2.3-19)$$

Určení R

$$R = \frac{\Delta p}{h \cdot \rho_{vz} \cdot u_0^2} = \frac{107,69}{0,53 \cdot 1,23 \cdot 0,145^2} = 7846,46 \text{ m}^{-1} \quad (2.3-20)$$

Graf bez volby parametrů



Graf 2.3. Vyhodnocení nezatížené chybou volby parametrů – suchý materiál

Vlhký materiál

Měření a výpočet pro vlhký materiál probíhalo obdobným způsobem jako pro suchý. Proto se v následující části omezím pouze na místa, kde se oba experimenty liší.

Podmínky v laboratoři

$t_{H_2O} = 22,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	(teplota vody u-manometru)
$\rho_{H_2O} (22,5 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 997,66 \text{ kg.m}^{-3}$	(hustota vody)
$t_{vz} = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$	(teplota vzduchu)
$p_{vz} = 99,54 \text{ kPa}$	(tlak vzduchu)
$\rho_{vz} (20 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 1,20 \text{ kg.m}^{-3}$	(hustota vzduchu)
$\mu_{vz} (19 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 18,13 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.s}$	(dynamická viskozita vzduchu)

Další parametry měření

$D = 0,084 \text{ m}$	(průměr reaktoru)
$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$	(gravitační zrychlení)
$D_p = 0,015 \text{ m}$	(charakteristický rozměr částic náplně)
$\varepsilon = 0,6$	(poróznost náplně)

Naměřené a vypočítané hodnoty

MOKRÝ MATERIÁL

Měření č.: 1

Výška vrstvy h 470 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	95	104	9	88,08	187,41	8,33E-04	0,150	249,74	37,15	839,14	6879,81
5000	86	112	26	254,46	541,41	1,39E-03	0,251	416,24	38,64	1398,57	7155,01
7000	75	124	49	479,57	1020,35	1,94E-03	0,351	582,74	37,15	1958,00	6879,81
9000	60	133	73	714,45	1520,12	2,50E-03	0,451	749,23	33,48	2517,42	6200,33
11200	40	157	117	1145,08	2436,35	3,11E-03	0,561	932,38	34,65	3132,79	6416,92

Měření č. 2

Výška vrstvy h 490 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	94	103	9	88,08	179,76	8,33E-04	0,150	249,74	35,63	839,14	6599,01
5000	88	110	22	215,31	439,42	1,39E-03	0,251	416,24	31,36	1398,57	5807,12
7000	79	118	39	381,69	778,97	1,94E-03	0,351	582,74	28,36	1958,00	5252,27
9000	68	129	61	597,01	1218,39	2,50E-03	0,451	749,23	26,84	2517,42	4969,62
11900	56	140	84	822,11	1677,78	3,31E-03	0,596	990,65	21,14	3328,59	3914,39

Měření č. 3

Výška vrstvy h 520 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	94	105	11	107,66	207,03	8,33E-04	0,150	249,74	41,04	839,14	7600,14
5000	87	111	24	234,89	451,71	1,39E-03	0,251	416,24	32,24	1398,57	5969,56
7000	77	121	44	430,63	828,13	1,94E-03	0,351	582,74	30,15	1958,00	5583,77
9000	65	132	67	655,73	1261,02	2,50E-03	0,451	749,23	27,78	2517,42	5143,53
11900	52	144	92	900,41	1731,55	3,31E-03	0,596	990,65	21,82	3328,59	4039,85

Měření č. 4

Výška vrstvy h 500 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	94	105	11	107,66	215,31	8,33E-04	0,150	249,74	42,68	839,14	7904,14
5000	86	113	27	264,25	528,50	1,39E-03	0,251	416,24	37,72	1398,57	6984,39
7000	75	123	48	469,78	939,56	1,94E-03	0,351	582,74	34,21	1958,00	6335,05
8900	62	136	74	724,24	1448,48	2,47E-03	0,446	740,91	32,62	2489,45	6041,66
10750	47	150	103	1008,07	2016,13	2,99E-03	0,539	894,92	31,13	3006,92	5764,01

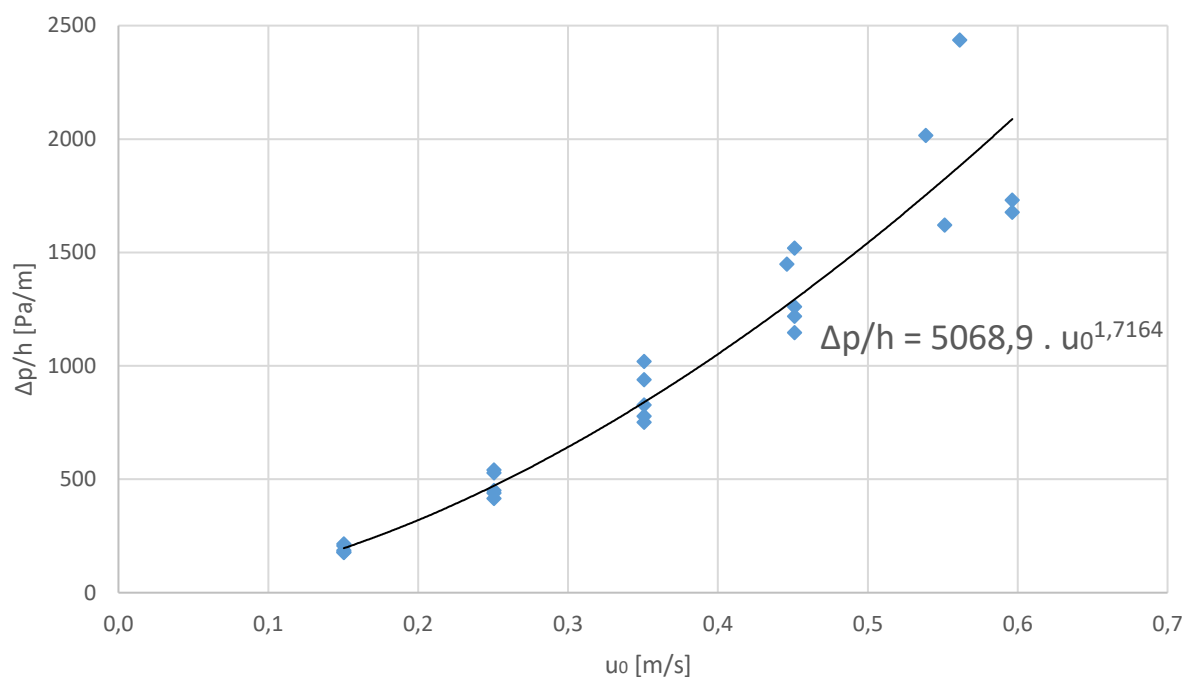
Měření č. 5

Výška vrstvy h 495 mm

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
3000	95	104	9	88,08	177,95	8,33E-04	0,150	249,74	35,27	839,14	6532,35
5000	89	110	21	205,53	415,21	1,39E-03	0,251	416,24	29,63	1398,57	5487,17
7000	80	118	38	371,91	751,33	1,94E-03	0,351	582,74	27,36	1958,00	5065,90
9000	70	128	58	567,65	1146,76	2,50E-03	0,451	749,23	25,26	2517,42	4677,48
11000	57	139	82	802,54	1621,29	3,06E-03	0,551	915,73	23,91	3076,85	4426,88

Tab 2.2. Vlhký materiál – tlaková ztráta, naměřené a vypočítané hodnoty

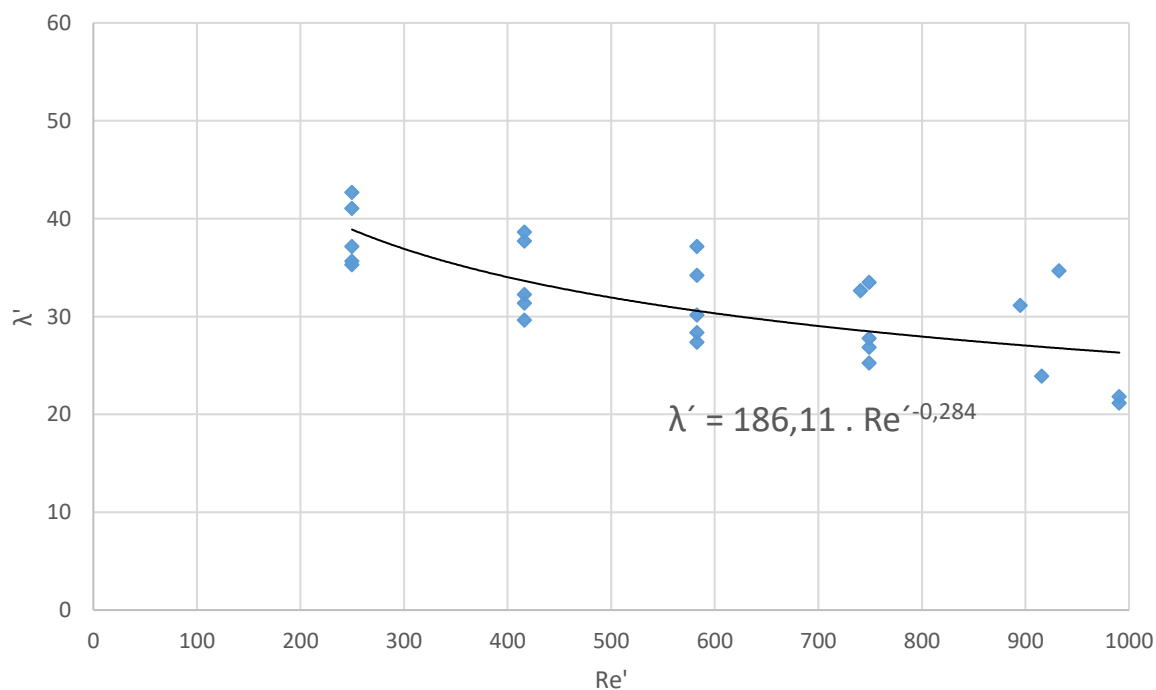
Graf primárních naměřených dat



Graf 2.4. Vyhodnocení primárních naměřených dat – vlhký materiál

Měření vzhledem k výsledkům můžeme opět považovat za uspokojivé.

Graf ve tvaru pro návrh experimentálního zařízení a scale-up

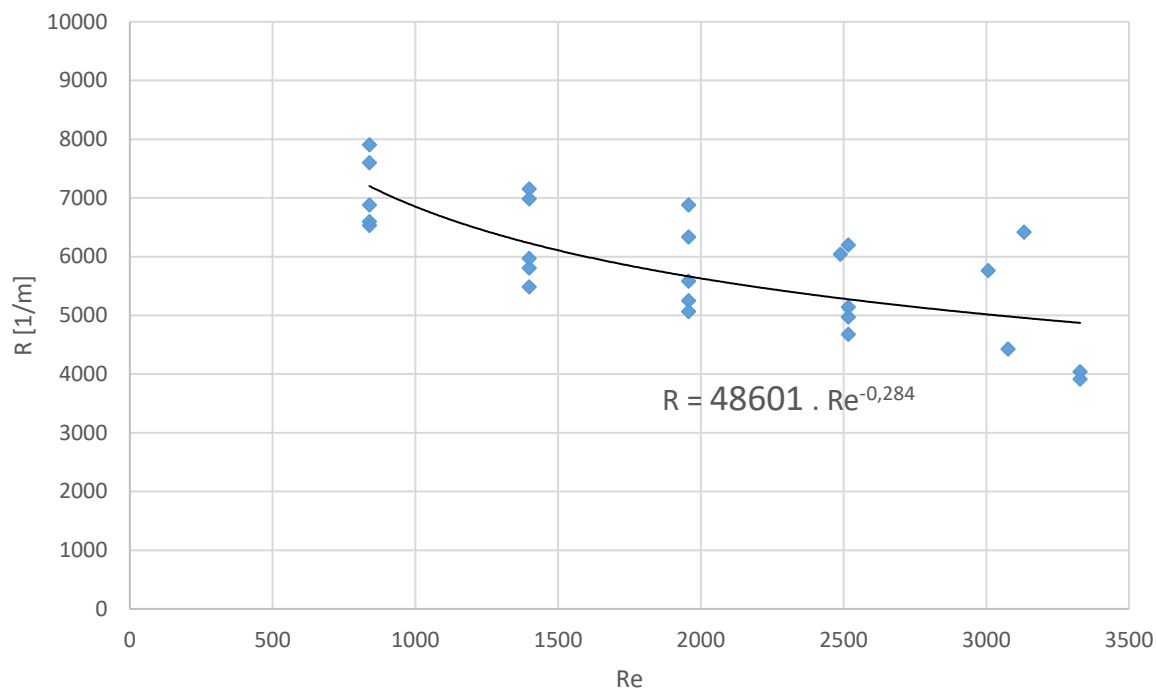


Graf 2.5. Vyhodnocení ve tvaru pro návrh zařízení – vlhký materiál

Výsledná rovnice pro následné výpočty tedy bude:

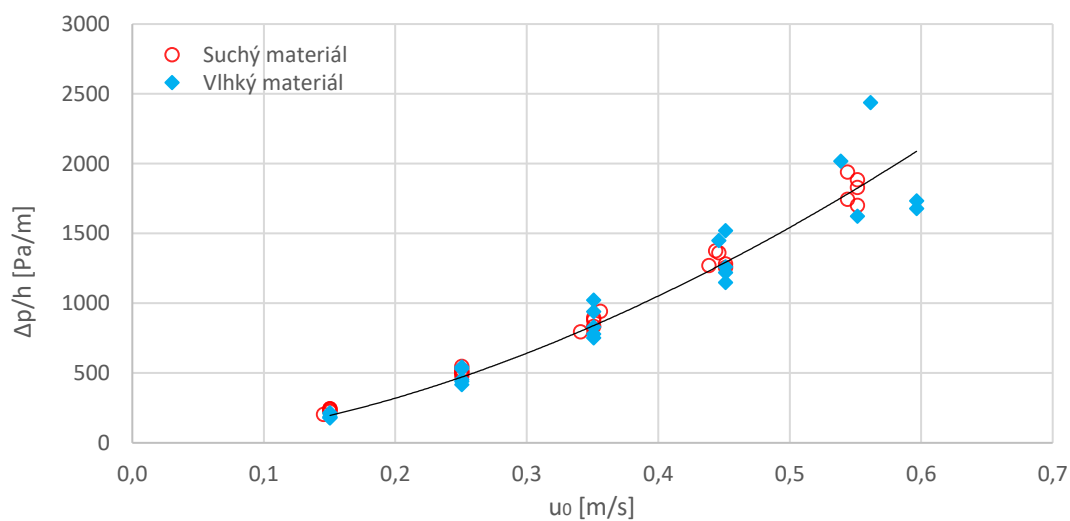
$$\lambda' = 186,11 \cdot Re'^{-0,284} \quad (2.3-21)$$

Graf bez volby parametrů

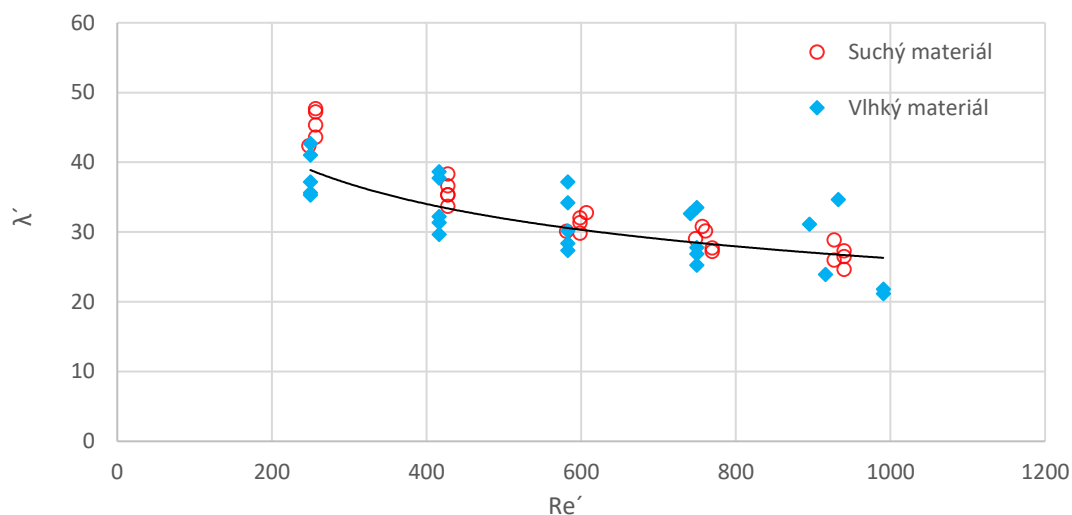


Graf 2.6. Vyhodnocení nezátížené chybou volby parametrů – vlhký materiál

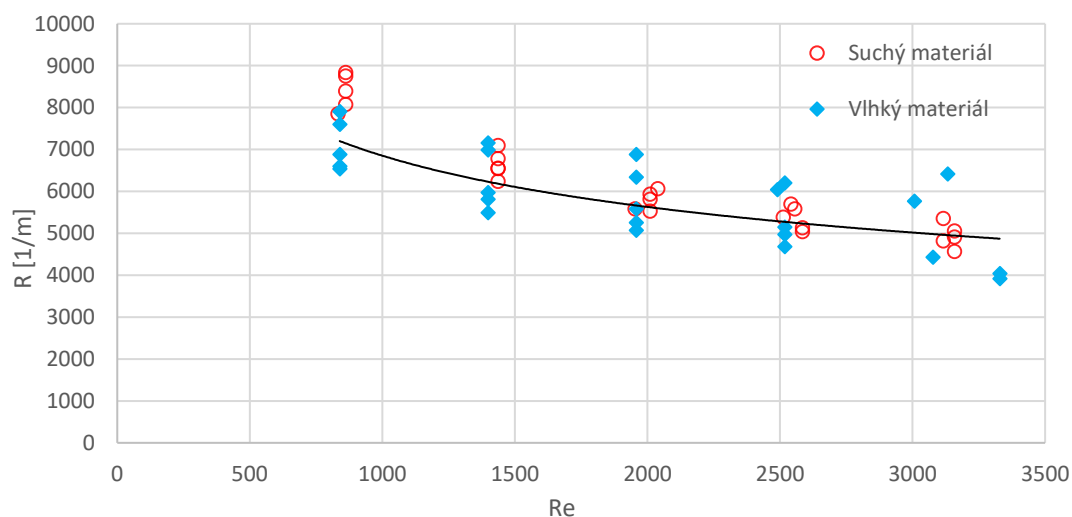
Grafické srovnání suchého a vlhkého materiálu



Graf 2.7. Srovnání primárních naměřených dat – suchý a vlhký materiál



Graf 2.8. Srovnání ve tvaru pro návrh zařízení – suchý a vlhký materiál



Graf 2.9. Srovnání bez zatížení volbou parametrů – suchý a vlhký materiál

Vyhodnocení přesnosti

Pro vyhodnocení přesnosti měření jsem vzal průměrné hodnoty z měření suchého a vlhkého materiálu. Z nich jsem si určil 10 %. Také jsem vypočetl směrodatnou odchylku v každém bodě. Po srovnání směrodatné odchylky s 10 % z každé hodnoty jsem dospěl k závěru, že do 10 % hranice se nevejdou pouze krajní body měření. Pro mou potřebu jsou však výsledky uspokojivé.

Vyhodnocení přesnosti

průměrné hodnoty

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
2990	94,1	105,1	11	107,68	211,43	8,31E-04	0,150	252,19	41,80	847,37	7741,08
5000	86,6	112,2	25,6	250,59	493,23	1,39E-03	0,251	421,75	34,89	1417,07	6460,60
6990	76,7	121,6	44,9	439,52	865,93	1,94E-03	0,350	589,59	31,33	1981,03	5802,65
8940	64,7	132,8	68,1	666,61	1313,43	2,48E-03	0,448	754,04	29,08	2533,58	5385,78
11145	50,5	146,7	96,2	941,68	1857,77	3,10E-03	0,559	939,85	26,59	3157,90	4924,63

10 % odchylka z průměrné hodnoty

Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
299	9,41	10,51	1,1	10,7678	21,1427575	8,306E-05	0,014987	25,2194	4,18019	84,7372	774,108
500	8,66	11,22	2,56	25,0594	49,322502	0,0001389	0,025062	42,1748	3,48873	141,707	646,06
699	7,67	12,16	4,49	43,9515	86,5926524	0,0001942	0,035037	58,9592	3,13343	198,103	580,265
894	6,47	13,28	6,81	66,6614	131,342672	0,0002483	0,044811	75,4041	2,90832	253,358	538,578
1114,5	5,05	14,67	9,62	94,1675	185,776529	0,0003096	0,055864	93,985	2,6593	315,79	492,463

směrodatné odchylky

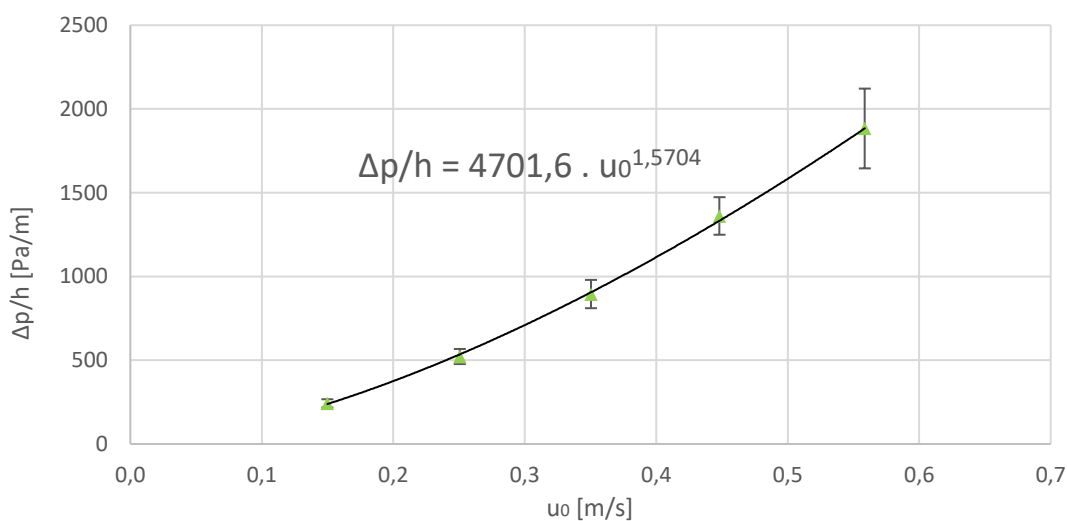
Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
31,622777	0,56765	1,19722	1,56347	15,32	24,67	8,78E-06	0,002	3,63	4,52	12,19	837,07
0	1,17379	1,47573	2,54733	24,96	45,07	0,00E+00	0,000	5,81	3,09	19,51	571,42
73,786479	2,00278	2,22111	4,17532	40,89	84,47	2,05E-05	0,004	9,55	2,87	32,08	532,31
87,559504	2,90784	2,78089	5,42525	53,14	112,06	2,43E-05	0,004	9,45	2,64	31,74	488,89
415,96608	5,06074	5,3965	10,4115	101,91	238,07	1,16E-04	0,021	30,08	4,15	101,06	769,21

10 % odchylka - směrodatná odchylka

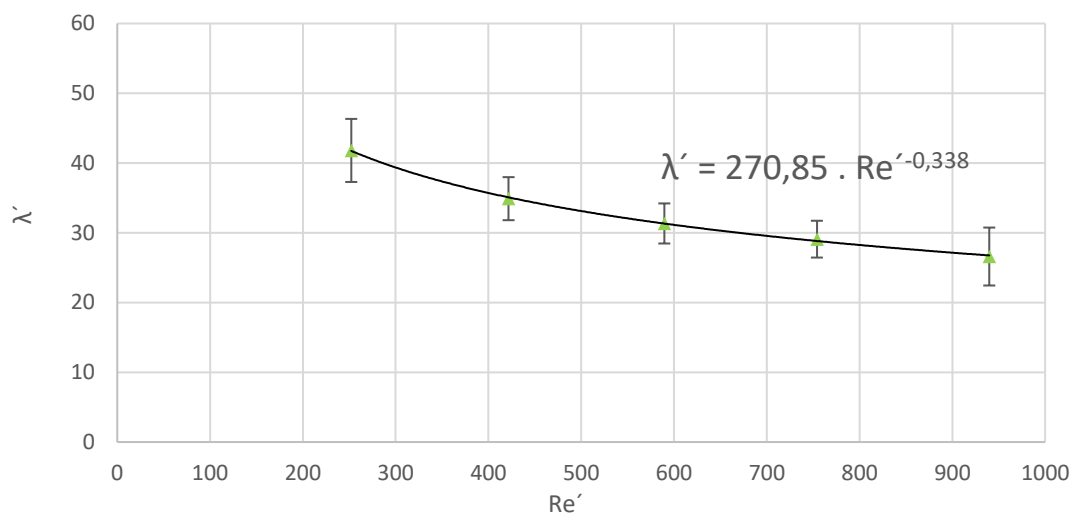
Průtok [l/h]	H1 [mm]	H2 [mm]	ΔH [mm]	Δp [Pa]	Δp/h [Pa/m]	V [m ³ .s]	u0 [m.s-1]	Re'	λ'	Re	R [1/m]
267,37722	8,84235	9,31278	-0,4635	-4,55	-3,53	7,43E-05	0,013	21,59	-0,34	72,55	-62,96
500	7,48621	9,74427	0,01267	0,10	4,25	1,39E-04	0,025	36,37	0,40	122,20	74,64
625,21352	5,66722	9,93889	0,31468	3,06	2,12	1,74E-04	0,031	49,41	0,26	166,02	47,96
806,4405	3,56216	10,4991	1,38475	13,53	19,28	2,24E-04	0,040	65,96	0,27	221,62	49,69
698,53392	-0,0107	9,2735	-0,7915	-7,75	-52,30	1,94E-04	0,035	63,91	-1,49	214,73	-276,75

Tab. 2.3. Vyhodnocení přesnosti

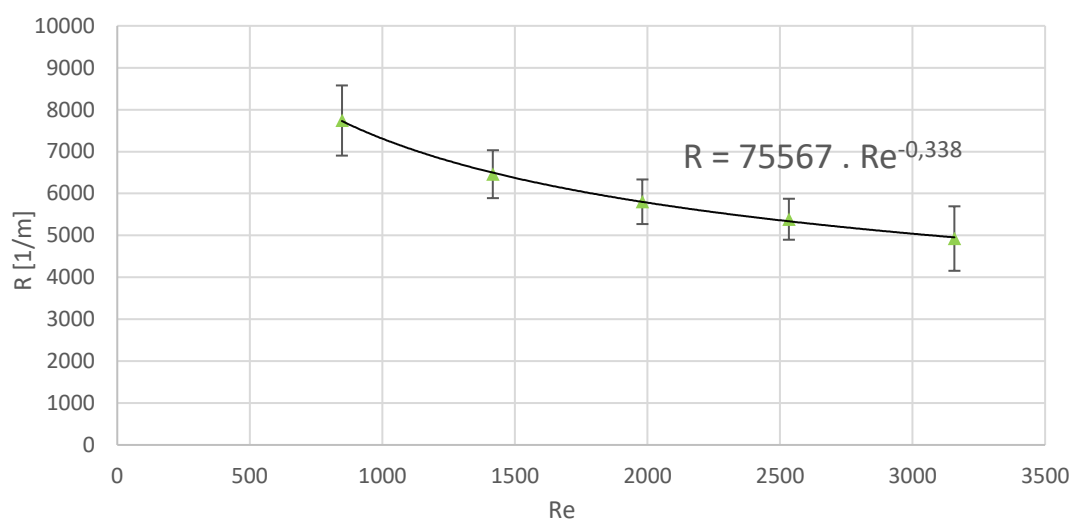
Grafické vyjádření



Graf 2.10. Vyhodnocení přesnosti primárních naměřených dat



Graf 2.11. Vyhodnocení přesnosti pro návrh zařízení



Graf 2.12. Vyhodnocení přesnosti bez zatížení chybou volbou parametrů

2.3.5 Vlastnosti jednotlivých složek náplně

Od VŠCHT jsem kromě směsi materiálů obdržel i jednotlivé složky náplně. Každou frakci jsem změřil a vyhodnotil obdobným způsobem jako směs. Využil jsem opět aparaturu, která je na obr. 2.4. Charakteristický rozměr D_p a porozitu ε jsem odhadoval.

Vzhledem k rozsáhlosti výsledků jsem zde pro každý materiál uvedl pouze graf naměřených dat. Celkové srovnání je shrnuto na konci kapitoly. Podrobné výpočty a veškeré grafy jsou k nahlédnutí v příloze.

Podmínky v laboratoři

$t_{H_2O} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	(teplota vody u-manometru)
$\rho_{H_2O} (28\text{ }^{\circ}\text{C}) = 996,22\text{ kg.m}^{-3}$	(hustota vody)
$t_{vz} = 28,3\text{ }^{\circ}\text{C}$	(teplota vzduchu)
$p_{vz} = 98,56\text{ kPa}$	(tlak vzduchu)
$\rho_{vz} (25\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1,18\text{ kg.m}^{-3}$	(hustota vzduchu)
$\mu_{vz} (28,3\text{ }^{\circ}\text{C}) = 18,56 \cdot 10^{-6}\text{ Pa.s}$	(dynamická viskozita vzduchu)

Mulč

Odhad konstant

$$D_p = 0,015 \text{ m}$$

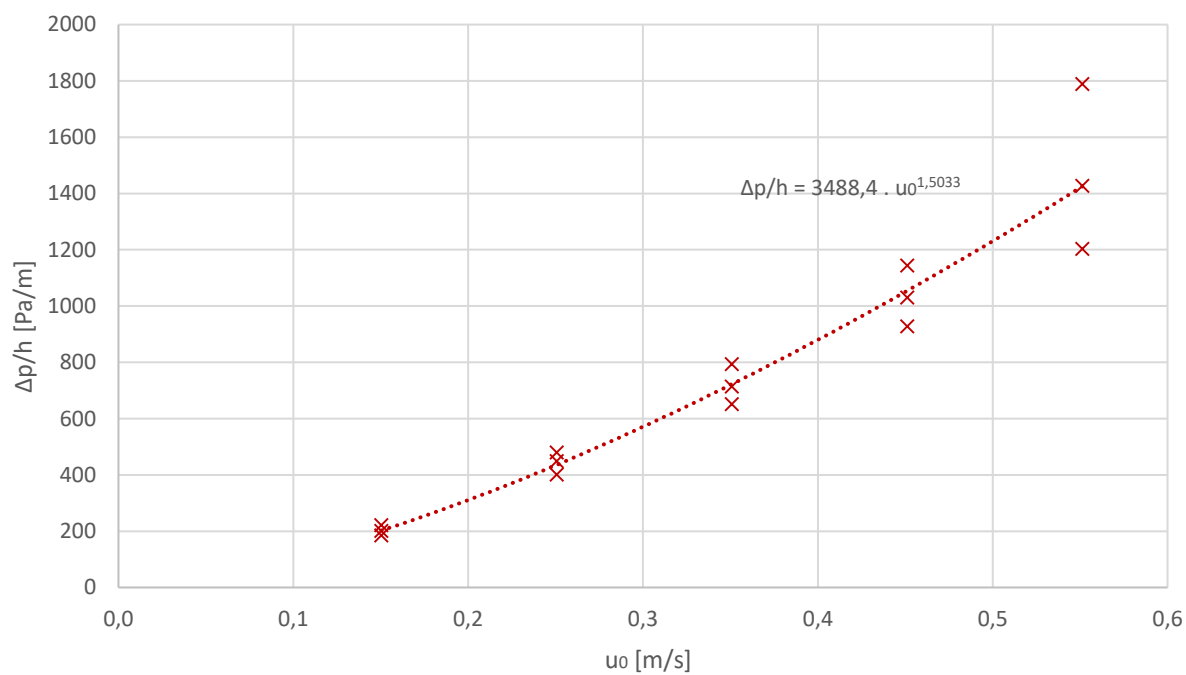
(charakteristický rozměr částic náplně)

$$\varepsilon = 0,6$$

(porozita náplně)



Obr. 2.9. Mulč



Graf 2.13. Mulč – primární naměřená data

Kůra

Odhad konstant

$$D_p = 0,02 \text{ m}$$

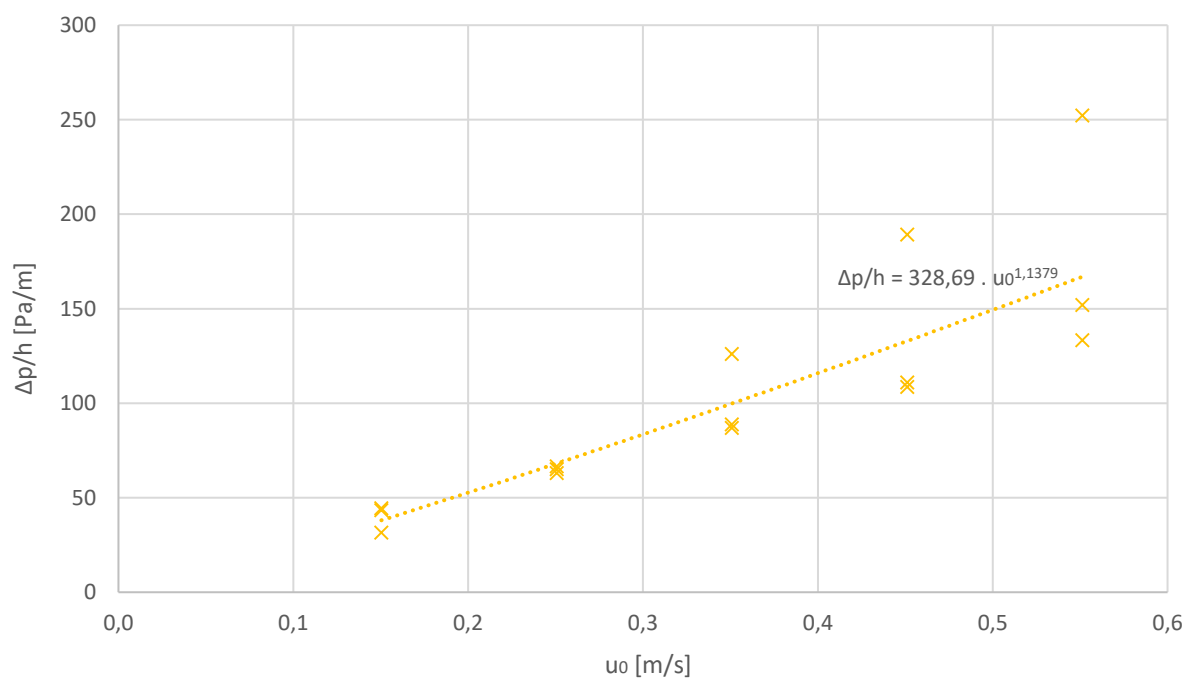
(charakteristický rozměr částic náplně)

$$\varepsilon = 0,7$$

(porozita náplně)



Obr. 2.10. Kůra



Graf 2.14. Kůra – primární naměřená data

Hoblíny

Odhad konstant

$D_p = 0,005 \text{ m}$

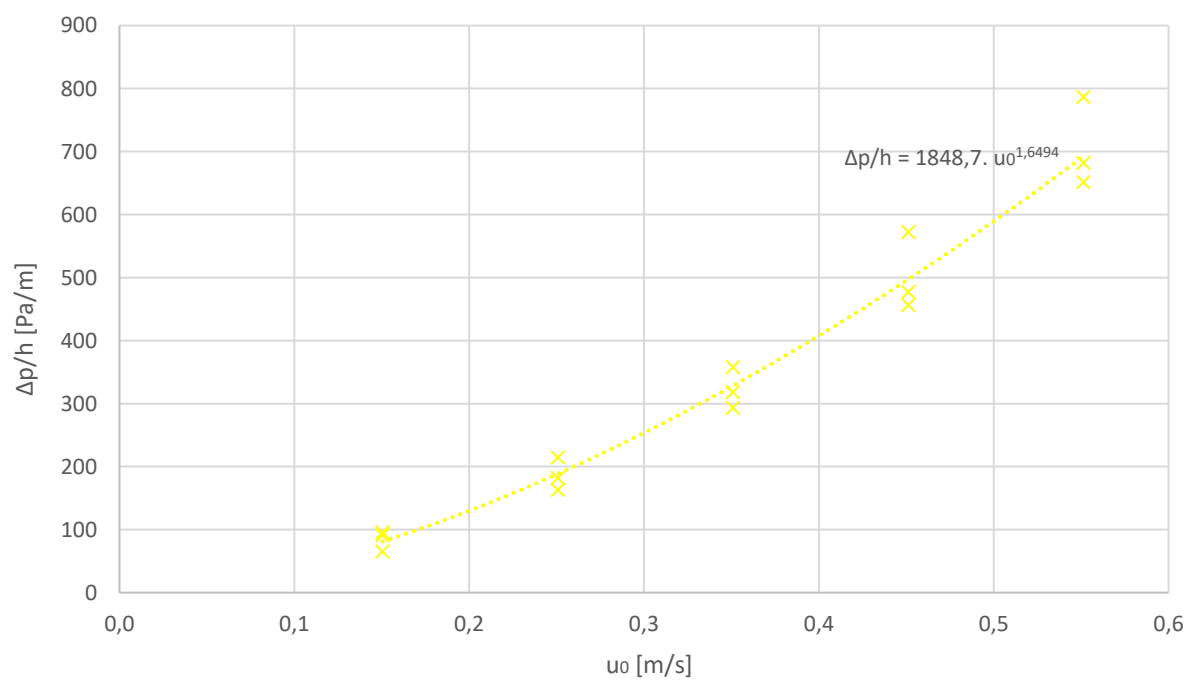
(charakteristický rozměr částic náplně)

$\varepsilon = 0,6$

(porozita náplně)



Obr. 2.11. Hobliny



Graf 2.15. Hobliny – primární naměřená data

Kukuřice

Odhad konstant

$$D_p = 0,007 \text{ m}$$

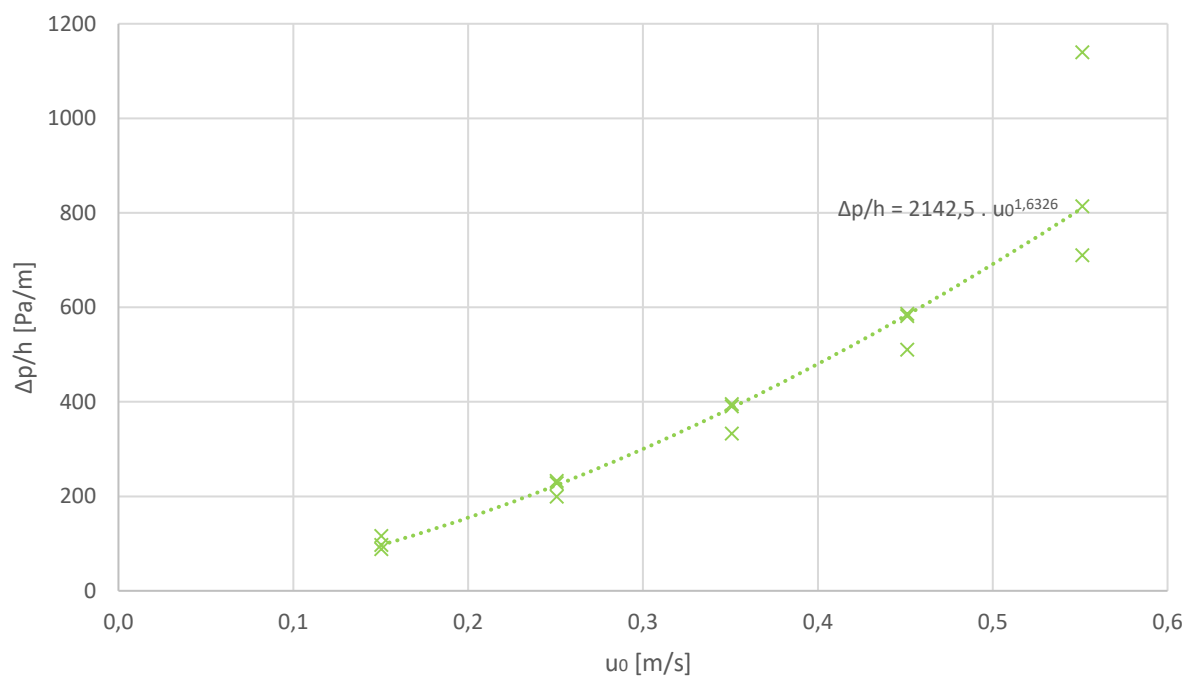
(charakteristický rozměr částic náplně)

$$\varepsilon = 0,6$$

(porozita náplně)



Obr. 2.12. Kukuřice



Graf 2.16. Kukuřice – primární naměřená data

Štěpka

Odhad konstant

$$D_p = 0,006 \text{ m}$$

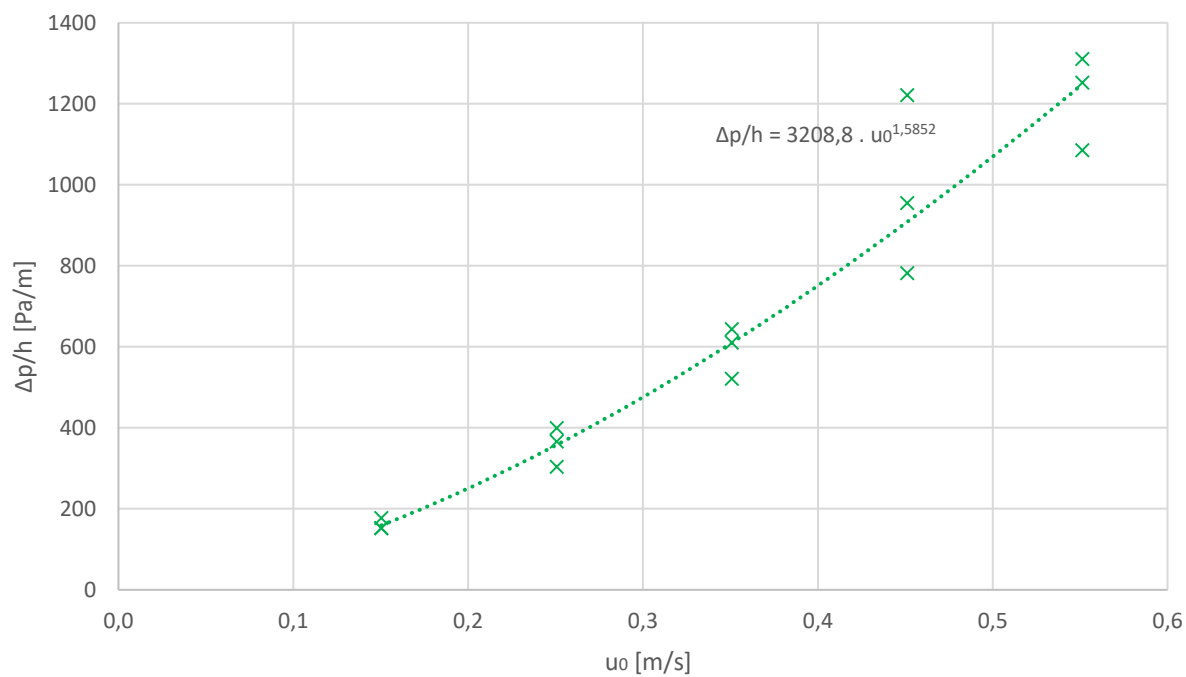
(charakteristický rozměr částic náplně)

$$\varepsilon = 0,6$$

(porozita náplně)



Obr. 2.13. Štěpka



Graf 2.17. Štěpka – primární naměřená data

Vermikulit

Odhad konstant

$$D_p = 0,002 \text{ m}$$

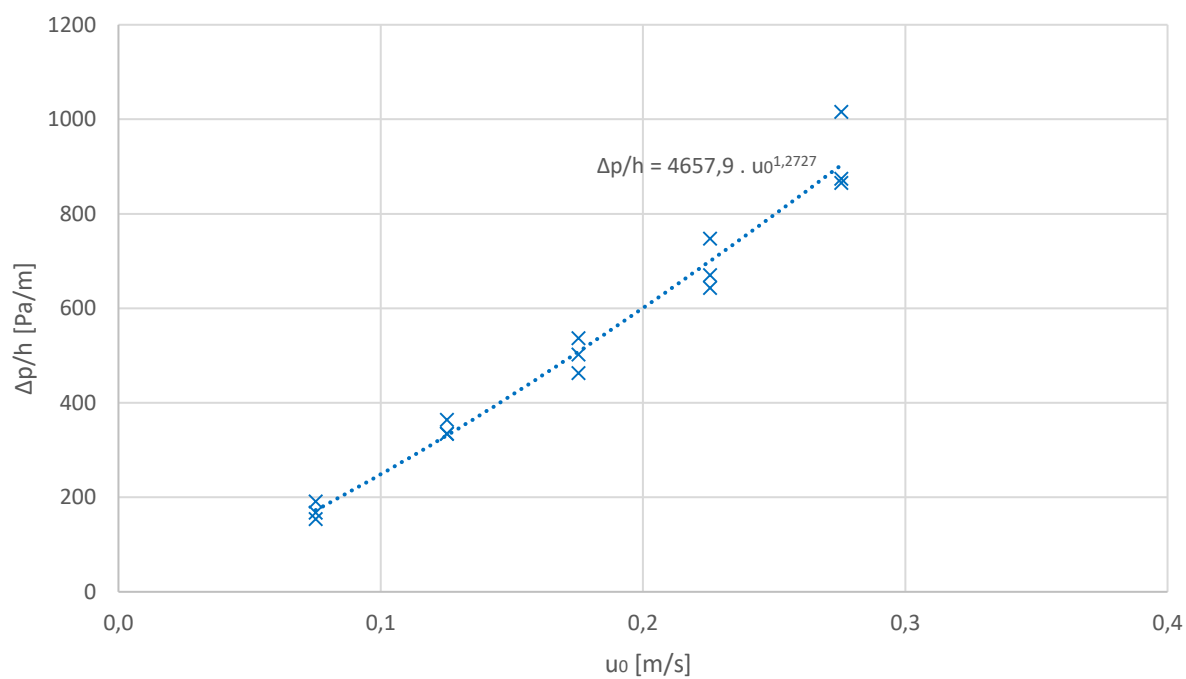
(charakteristický rozměr částic náplně)

$$\varepsilon = 0,6$$

(porozita náplně)



Obr. 2.14. Vermikulit



Graf 2.18. Vermikulit – primární naměřená data

Zeolit

Odhad konstant

$$D_p = 0,004 \text{ m}$$

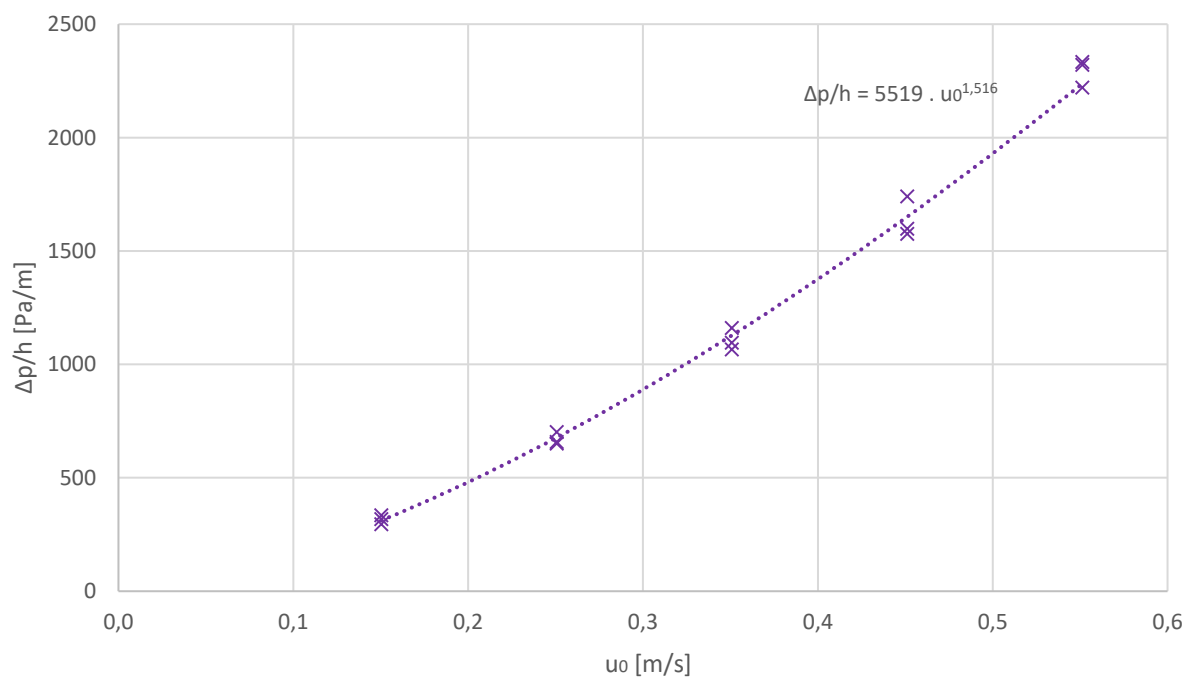
(charakteristický rozměr částic náplně)

$$\varepsilon = 0,6$$

(porozita náplně)



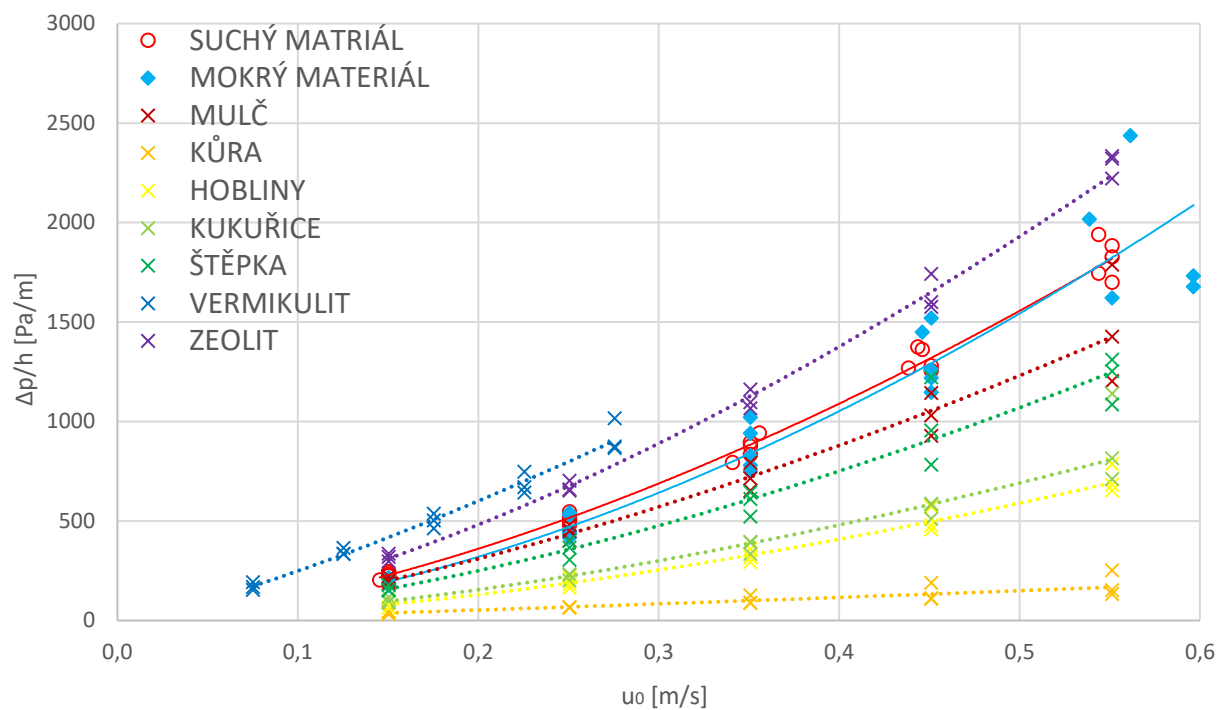
Obr. 2.15. Zeolit



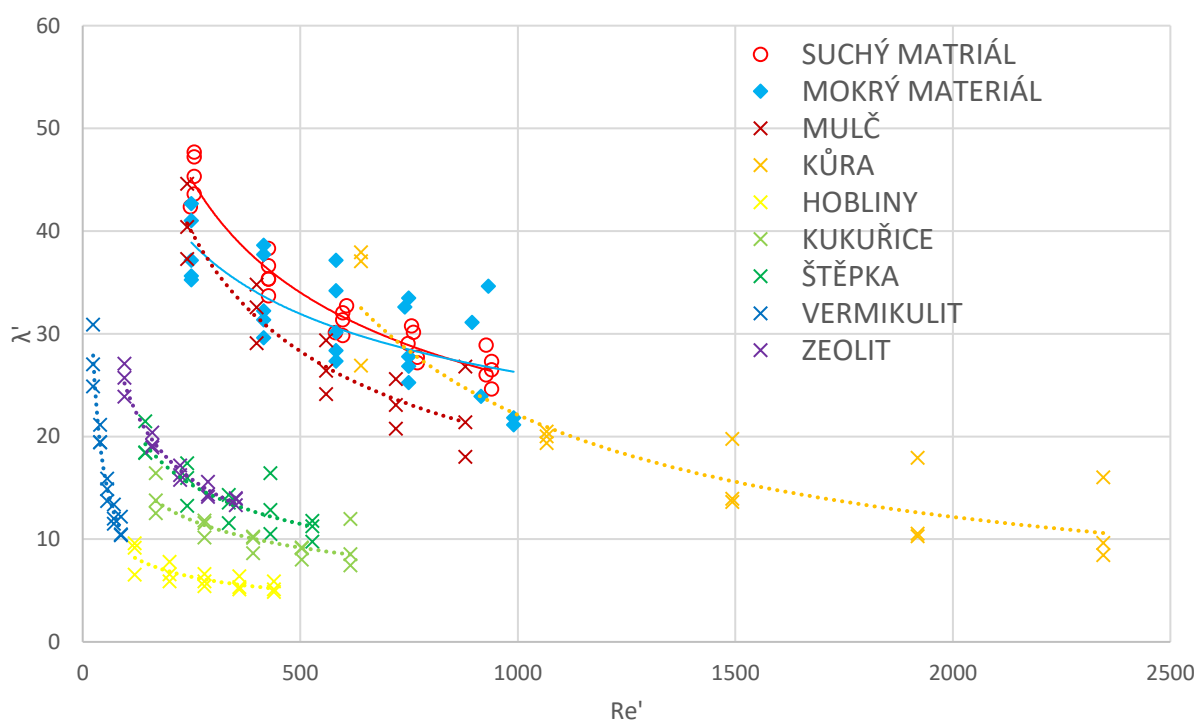
Graf 2.19. Zeolit – primární naměřená data

Shrnutí výsledků

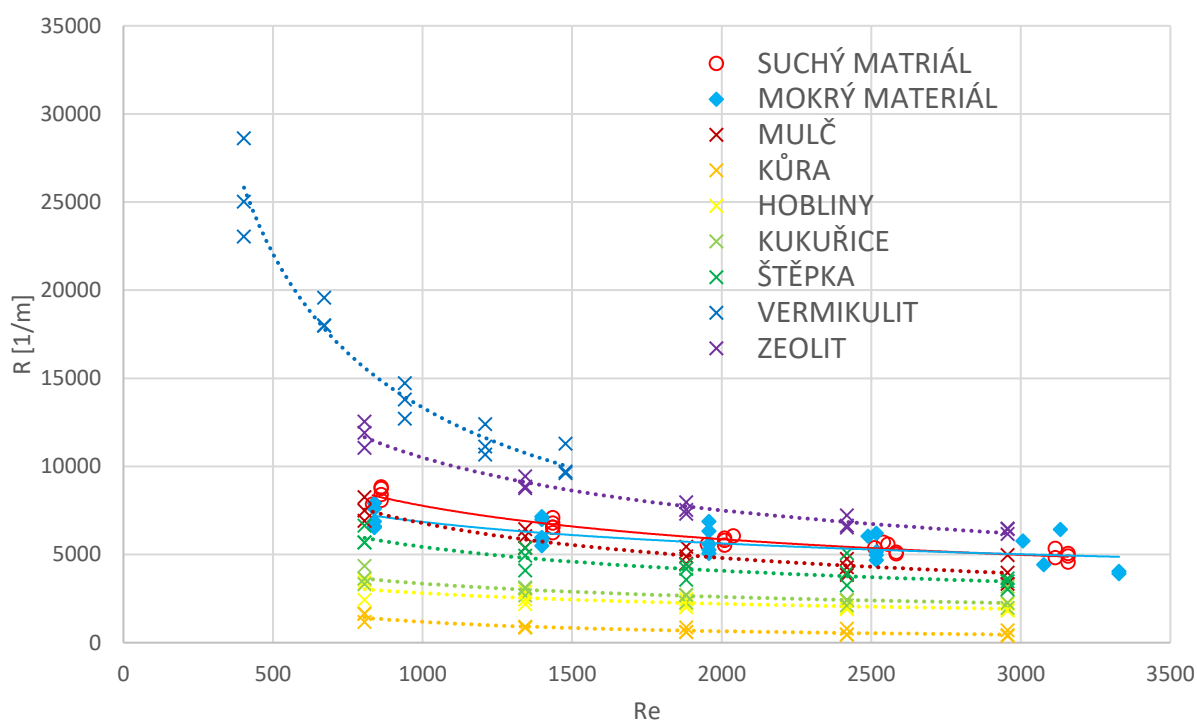
Pro úplnost jsem všechny materiály vložil do jednoho grafu a přidal k nim i výsledky pro suchou a vlhkou směs.



Graf 2.20. Shrnutí primárních naměřených hodnot



Graf 2.21. Shrnutí pro návrh experimentálního zařízení



Graf 2.22. Shrnutí bez zatížení volbou parametrů

Závěr

Charakteristiky suchého, resp. mokrého materiálu $\Delta p/h = f(u_0)$ a $R = f(Re)$ se blíží materiálům mulče a štěrky. Jejich vliv na celkový výsledek je tedy zásadní. Problémem při mých experimentech může být přílišná velikost některých složek náplně ku malému průměru zařízení. Tím může být snížena tlaková ztráta vlivem menších odporů u stěn aparátu. Abychom dosáhli správných hodnot pro scale-up parametry, je zapotřebí navrhnout čtvrt - provozní zařízení, kde eliminujeme vliv proudění podél stěn větším průměrem. Na něm provedeme obdobné měření.

2.4 NÁVRHOVÉ VÝPOČTY A BASIC DESIGN

V této části se chci věnovat výpočtům potřebným pro návrh a basic design zařízení. Vycházel jsem z proudového technologického schématu a předchozích výpočtů v experimentu. Dále jsem respektoval požadavky na zařízení.

2.4.1 Výpočty

Výpočty pro návrh jsou postaveny na zachování konstantní průtočné rychlosti zařízením na vstupu do biofiltru u_0 . Aby byla zachována tato rychlost i v zařízení o větším průměru D , je třeba navýšit velikost průtoku plynu. Pro úplnost jsem volil minimální a maximální množství plynu. Výpočtové vztahy jsou obdobné jako v experimentální části.

Jako vlastnosti prostředí jsem vzal hodnoty vlhké náplně. Pro výpočet tlakové ztráty jsem volil regresi a její výsledky pro průměr suchého a vlhkého lože (graf 2.11.).

Rychlost u_0

Uřídí se z průtoku plynu a průřezu zařízení.

Průtok vzduchu

$$V_{\min,vz} = 3000 \text{ l.h}^{-1} = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$V_{\max,vz} = 11000 \text{ l.h}^{-1} = 3,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Průřez experimentálního reaktoru byl vypočten již ve vztahu (2.3-13)

$$D = 0,084 \text{ m} \quad (\text{průměr experimentálního reaktoru})$$

$$S = 5,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$u_{0,\min} = \frac{V_{\min,vz}}{S} = \frac{0,833 \cdot 10^{-3}}{5,54 \cdot 10^{-3}} = 0,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.4-1)$$

$$u_{0,\max} = \frac{V_{\max,vz}}{S} = \frac{3,056 \cdot 10^{-3}}{5,54 \cdot 10^{-3}} = 0,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.4-2)$$

Nové průtoky vzduchu

Návrhový průměr reaktoru

$$D = 0,2 \text{ m}$$

Průřez reaktoru

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} = 31,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (2.4-3)$$

$$V_{\min, \text{vz}} = u_0 \cdot S = 0,15 \cdot 31,42 \cdot 10^{-3} = 4,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 17007 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (2.4-4)$$

$$V_{\max, \text{vz}} = u_0 \cdot S = 0,55 \cdot 31,42 \cdot 10^{-3} = 17,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 62358 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (2.4-5)$$

Parametry prostředí a vrstvy

$D_p = 0,01 \text{ m}$ (charakteristický rozměr částic náplně)

$\varepsilon = 0,6$ (porozita náplně)

$H = 1 \text{ m}$ (maximální výška vrstvy)

$\rho_{\text{vz}} (20 \text{ }^\circ\text{C}) = 1,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (hustota vzduchu)

$\mu_{\text{vz}} (19 \text{ }^\circ\text{C}) = 18,13 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (dynamická viskozita vzduchu)

$\rho_{\text{H}_2\text{O}} (22,5 \text{ }^\circ\text{C}) = 997,66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (hustota vody)

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (gravitační zrychlení)

Poznámka: Výška vrstvy H se sice neshoduje s požadavkem $H/D = 1,5$, ale zařízení má být variabilní v možnosti nastavování procesních podmínek. Proto bude u navrhovaného zařízení možno dosáhnout výšky filtrační vrstvy až 1 m.

Určení Re'

$$Re' = \frac{u_0 \cdot D_p \cdot \rho_{\text{vz}}}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_{\text{vz}}} \quad (2.4-6)$$

$$Re'_{\min} = \frac{u_{0, \min} \cdot D_p \cdot \rho_{\text{vz}}}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_{\text{vz}}} = \frac{0,15 \cdot 0,01 \cdot 1,2}{(1 - 0,6) \cdot 18,13 \cdot 10^{-6}} = 249,74 \quad (2.4-7)$$

$$Re'_{\max} = \frac{u_{0, \max} \cdot D_p \cdot \rho_{\text{vz}}}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_{\text{vz}}} = \frac{0,55 \cdot 0,01 \cdot 1,2}{(1 - 0,6) \cdot 18,13 \cdot 10^{-6}} = 915,73 \quad (2.4-8)$$

Tlaková ztráta

Pro stanovení tlakové ztráty jsem nejprve dosadil do výsledného regresního modelu pro λ' , které potřebuji do výpočtu.

Určení λ'

$$\lambda' = 270,85 \cdot Re'^{-0,338} \quad (2.4-9)$$

$$\lambda'_{min} = 270,85 \cdot Re'_{min}{}^{-0,338} = 270,85 \cdot 249,74^{-0,338} = 41,92 \quad (2.4-10)$$

$$\lambda'_{max} = 270,85 \cdot Re'_{max}{}^{-0,338} = 270,85 \cdot 915,73^{-0,338} = 27,02 \quad (2.4-11)$$

$$\Delta p_z = \lambda' \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{H}{D_p} \cdot u_0^2 \cdot \rho_{vz} \quad (2.4-12)$$

$$\Delta p_{z,min} = \lambda'_{min} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{H}{D_p} \cdot u_{0,min}^2 \cdot \rho_{vz} = \quad (2.4-13)$$

$$= 41,92 \cdot \frac{1 - 0,6}{0,6^3} \cdot \frac{1}{0,01} \cdot 0,15^2 \cdot 1,2 = 211,45 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{z,max} = \lambda'_{max} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{H}{D_p} \cdot u_{0,max}^2 \cdot \rho_{vz} = \quad (2.4-14)$$

$$= 27,02 \cdot \frac{1 - 0,6}{0,6^3} \cdot \frac{1}{0,01} \cdot 0,55^2 \cdot 1,2 = 1832,4 \text{ Pa}$$

Rozdíl hladin v manometru

$$\Delta p_z = \Delta H \cdot \rho \cdot g \rightarrow \Delta H \quad (2.4-15)$$

$$\Delta H_{min} = \frac{\Delta p_{z,min}}{\rho_{H_2O} \cdot g} = \frac{211,45}{997,66 \cdot 9,81} = 0,0216 \text{ m} = 21,60 \text{ mm} \quad (2.4-16)$$

$$\Delta H_{max} = \frac{\Delta p_{z,max}}{\rho_{H_2O} \cdot g} = \frac{1832,4}{997,66 \cdot 9,81} = 0,1872 \text{ m} = 187,23 \text{ mm} \quad (2.4-17)$$

Průtok skrápěcí kapaliny

Návrh průtoku s kapaliny vychází ze zadaných parametrů.

$$\frac{V_{vz}}{V_{kap}} = \frac{2}{1} \quad (2.4-18)$$

$$V_{min,kap} = \frac{V_{min,vz}}{2} = \frac{17007}{2} = 8503 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (2.4-19)$$

$$V_{max,kap} = \frac{V_{max,vz}}{2} = \frac{62358}{2} = 31179 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (2.4-20)$$

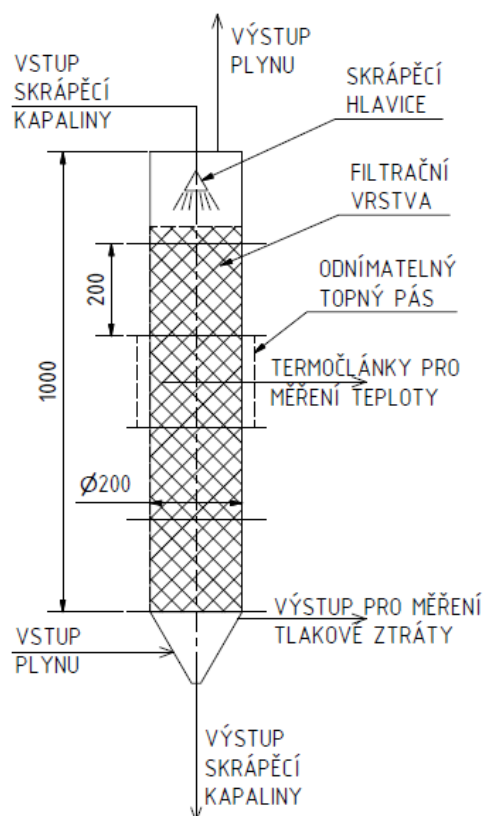
2.4.2 Basic design

V této části jsem se zaměřil na základní uspořádání a představu o konečném zařízení. Důležitým faktorem je, že se jedná o biofiltr, který by měl být snadno modifikovatelný dle specifické potřeby konkrétní úlohy.

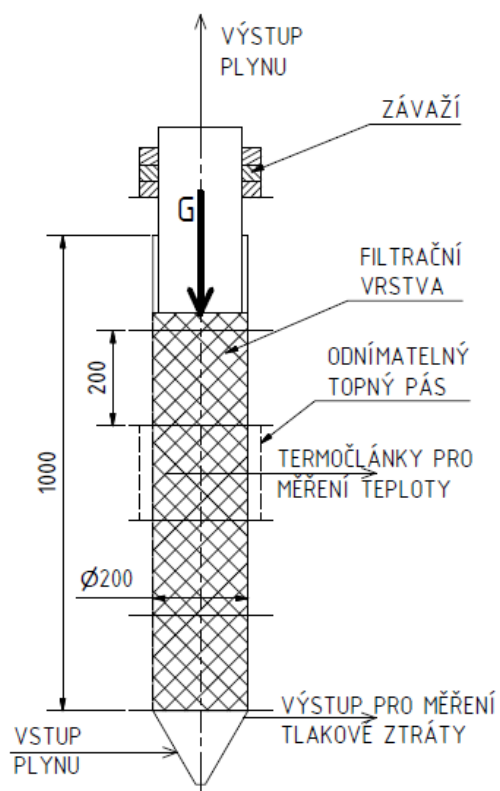
Mezi konstrukční požadavky patří válcový průřez. Průměr jsem zvolil 200 mm. Reaktor bude tvořen 5 segmenty, které budou mít výšku taktéž 200 mm. Toto segmentové uspořádání umožní jednoduché přestavení daných prvků v sestavě a libovolně nastavovat výšku aparátu. Ve spodní části bude kuželové dno pro odtok skrápěcí vody a vstup plynu. Na vrchu mají být dvě možnosti, skrápění nebo zatěžování. Ve střední části je třeba umístit měřicí a topný segment.

V první řadě má umožňovat protiproudý dvoufázový průtok plynu vůči kapalině. Plyn proudí ode dna filtru k vrchní části, kde odchází do atmosféry. Naopak skrápěcí voda dopadá na povrch lože a odchází dnem. V druhé variantě je požadováno, aby filtr umožňoval jednofázový průtok plynu, u kterého chceme modelovat stárnutí lože sesednutím. Tento jev bude vytvořen zatížením vrstvy závažím o síle $G = 5 \text{ kg}$.

Model se dále omezuje na ohřev pomocí topného pásu připnutého na povrch biofiltru a nebude umožňovat v základní konstrukci možnost ohřevu pomocí magnetronu, kde je třeba vytvořit vnitřní trubku uprostřed (viz. PTS obr 2.1.). Ovšem pokud by bylo třeba, bude se dát tento prvek v budoucnu vyrobit a jednoduše vmontovat do stávající aparatury. Důvodem je, že na modelu je požadováno měřit hlavně proudovou charakteristiku, nikoli však vliv tepla na funkci mikroorganismů.



Obr. 2.16. Basic design biofiltru se skrápěním

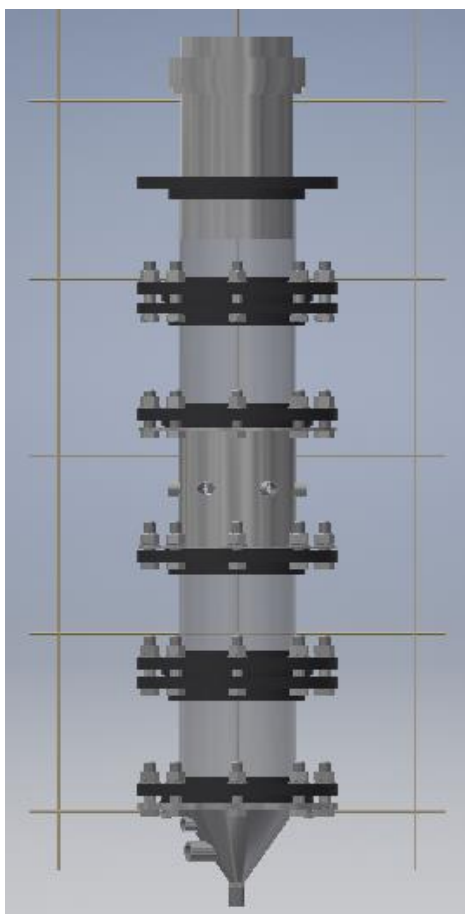


Obr. 2.17. Basic design biofiltru se zatěžováním

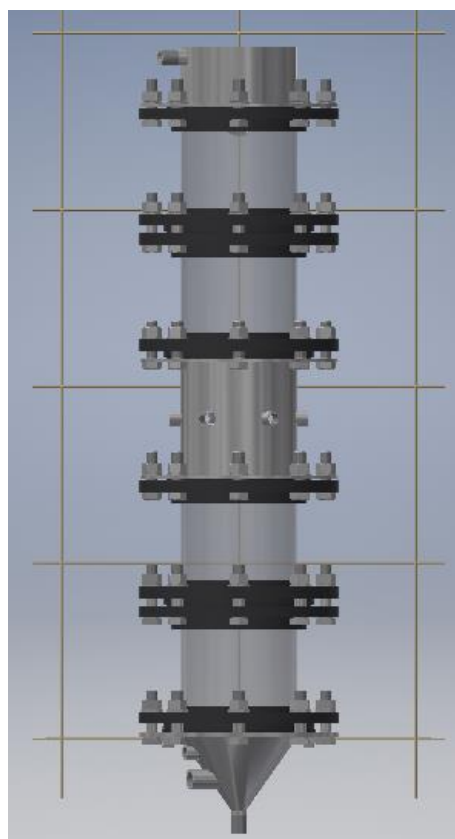
2.5 VÝROBNÍ DOKUMENTACE

Na základě basic designu, předchozích výpočtů a poznatků jsem vytvořil výrobní dokumentaci pro výrobu zařízení. Tyto podklady jsou cílem této diplomové práce. Tím je tato část nejdůležitější. Výkresy budou sloužit jako podklady pro realizaci laboratorního biofiltru. Model a výkresy jsem vytvářel v programu Autodesk Inventor Professional 2016.

2.5.1 3D model



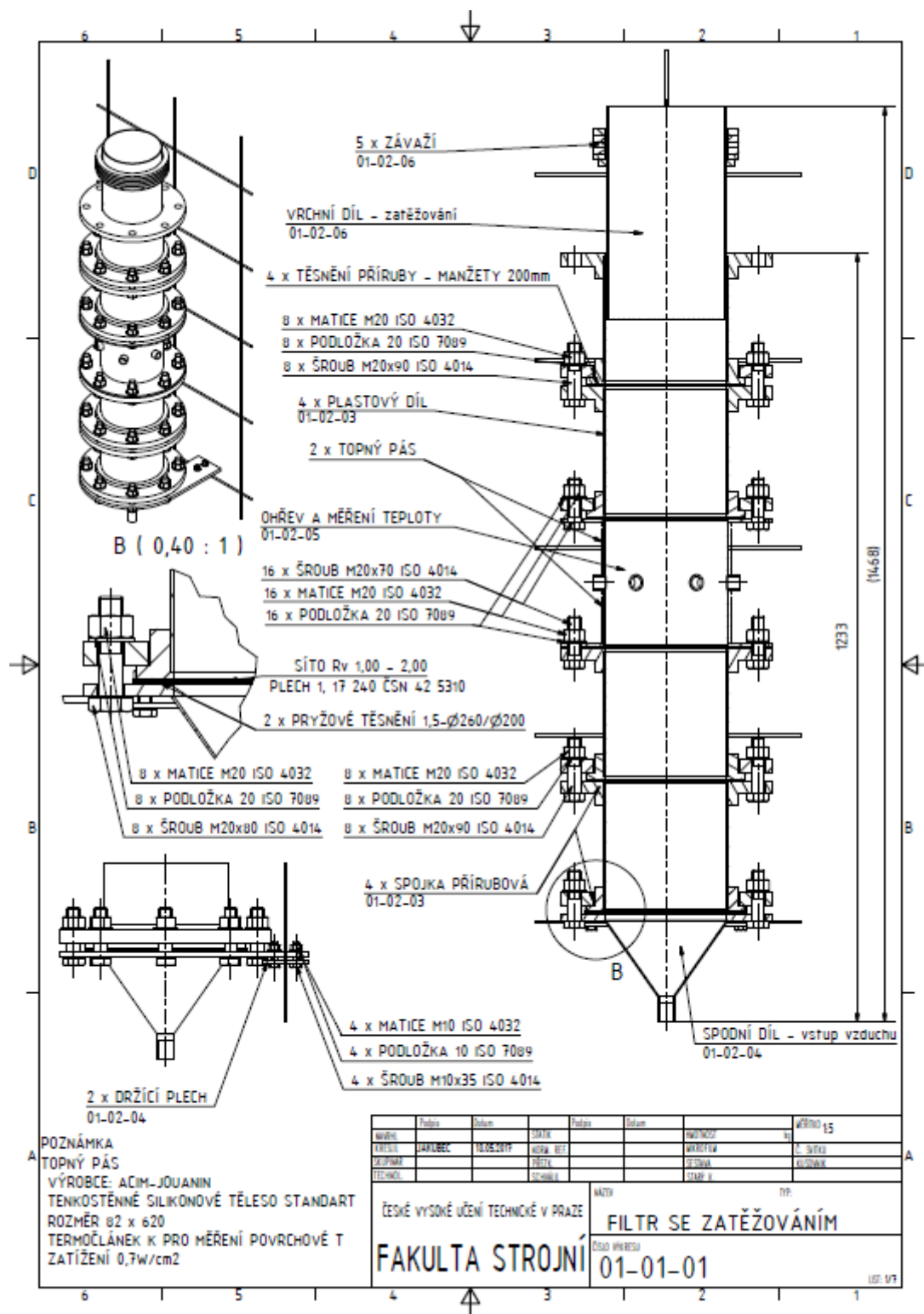
Obr. 2.18. 3D model zařízení se zatěžováním



Obr. 2.19. 3D model zařízení se sprchou

Na předchozích dvou obrázcích je vidět rozdíl ve dvou možných variantách poskládání zařízení. Obr. 2.18. prezentuje biofiltr se zatěžováním, kde na lože působí zatížení. Tato varianta umožňuje jednofázový průtok plynu ložem. Na obr. 2.19. je místo zatížení sprchovací jednotka, která slouží ke skrápění lože a umožní nám dvoufázový průtok náplní.

2.5.2 Filtr se zatěžováním



Obr. 2.20. Filtr se zatěžováním

Na tomto obrázku je vidět zařízení, které má na vrchu zatěžovací jednotku. Ta bude popsána v kapitole 2.5.7. Spodní díl pro vstup vzduchu a výstupu pro měření tlakové ztráty

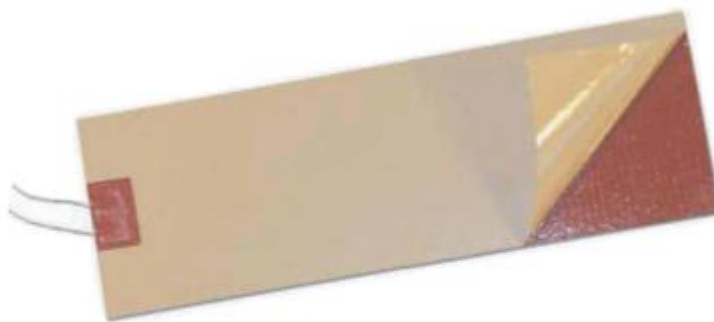
je rozebrán v kapitole 2.5.5. Tělo biofiltru je tvořeno 5 dílci, z nichž 4 jsou z průhledného PVC materiálu (kapitola 2.5.4), a jednoho nerezového dílce pro měření teploty a ohřev náplně (2.5.6).

Nosné síto

Náplň biofiltru nese nerezový děrovaný plech (Rv 1,00-2,00), který zároveň umožňuje vstup plynu do filtru. Toto síto je vloženo mezi spodní příruby a je možné je dle potřeby měnit (rozměr a rozteč děr).

Topný pás

Střední díl na ohřev a měření teploty je vybaven dvěma topnými pásy, již dodává firma ACIM-JOUANIN. Potřebný rozměr je 82 x 620 mm s výkonem $0,7 \text{ W.cm}^{-2}$. Bude vybaven i termočlánkem K pro měření povrchové teploty biofiltru.

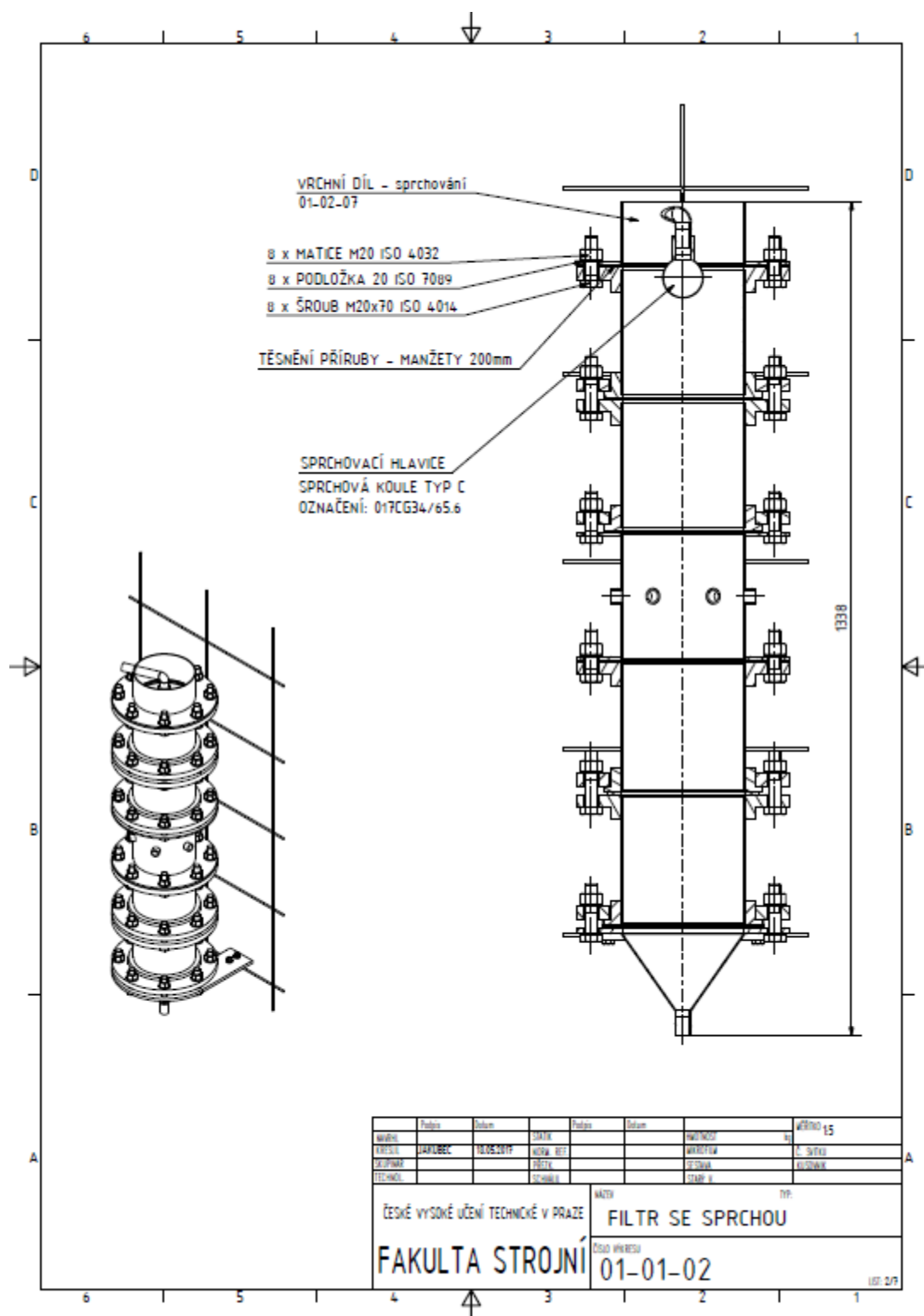


Obr. 2.21. Topný pás (firma ACIM-JOUANIN)

Spojovací součásti

Spojovací součásti (šrouby, matice, podložky) jsou běžného typu. Podrobně jsou popsány ve výkrese (obr. 2.20., 2.22.).

2.5.3 Filtr se sprchou

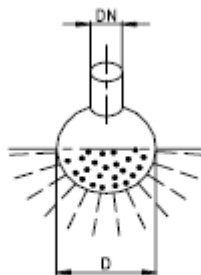


Obr. 2.22. Filtr se sprchou

Místo zatěžovací soustavy (kapitola 2.5.7) je na vrh biofiltru nainstalována skrápěcí jednotka (2.5.8).

Sprchovací hlavice

Jedná se o sprchovací hlavici, která umožňuje rovnoměrný nátok kapaliny na lože. Tyto sprchy vyrábí například firma ARMAT spol. s r.o. Je požadován typ C se spodní děrovanou polokoulí. Připojení k jednotce je přes závit G 3/4. Katalogové označení 017CG34/65.6.

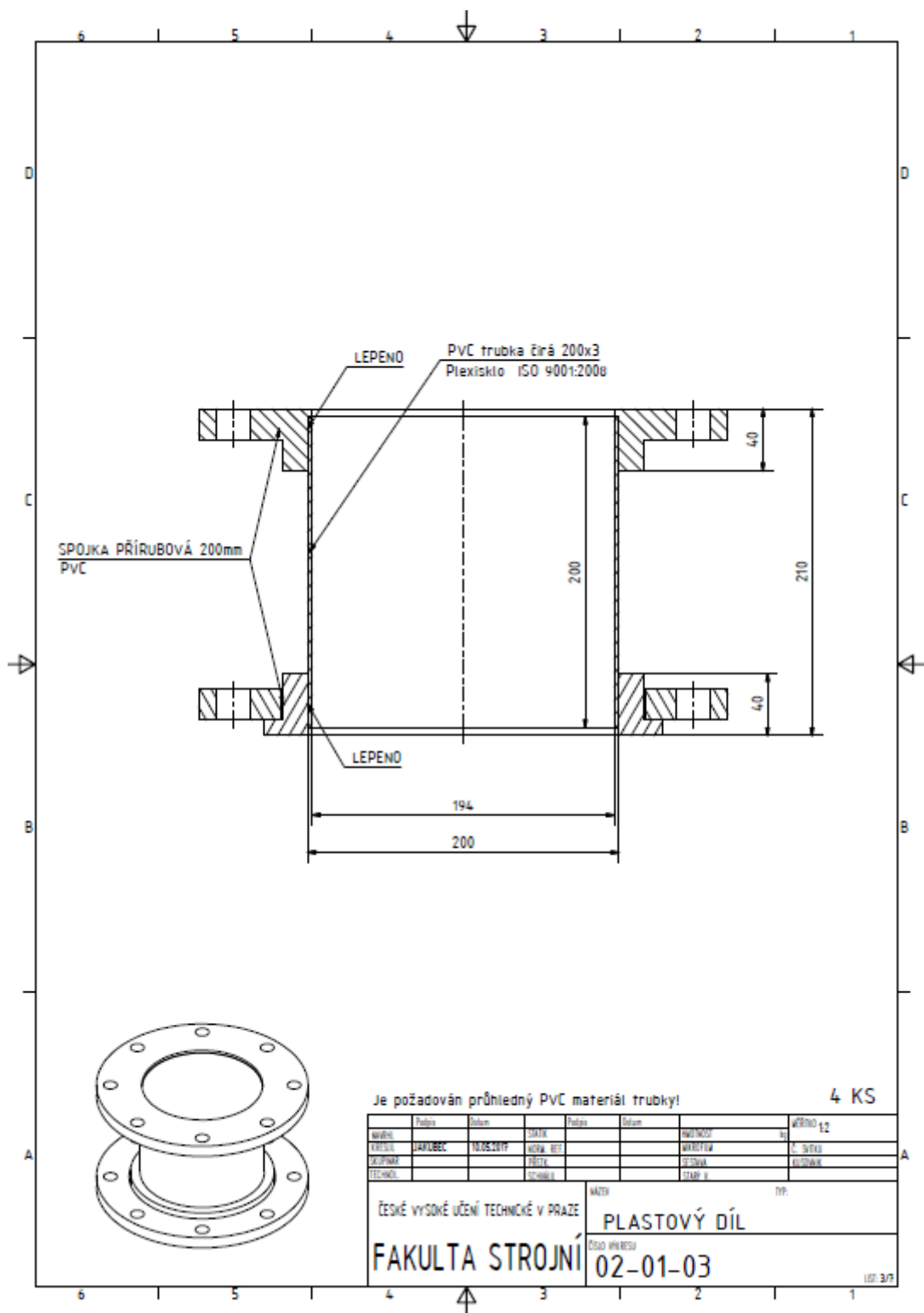


Type C

Kód	D (Ø koule)	DN (Ø připojení)	Ø děr	tlak	průtok	rádius dosahu
017AG34/65.6					13,2 m ³ /h	1,3 m
017BG34/65.6	65 mm	G 3/4" F	2,5 mm	1 bar	8,7 m ³ /h	2,2 m
017CG34/65.6					9,2 m ³ /h	2,5 m
017DG34/65.6					9,2 m ³ /h	2,5 m

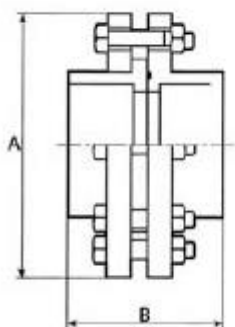
Obr. 2.23. Katalog firmy ARMAT spol. s r.o.

2.5.4 Plastový díl



Obr. 2.24. Plastový díl

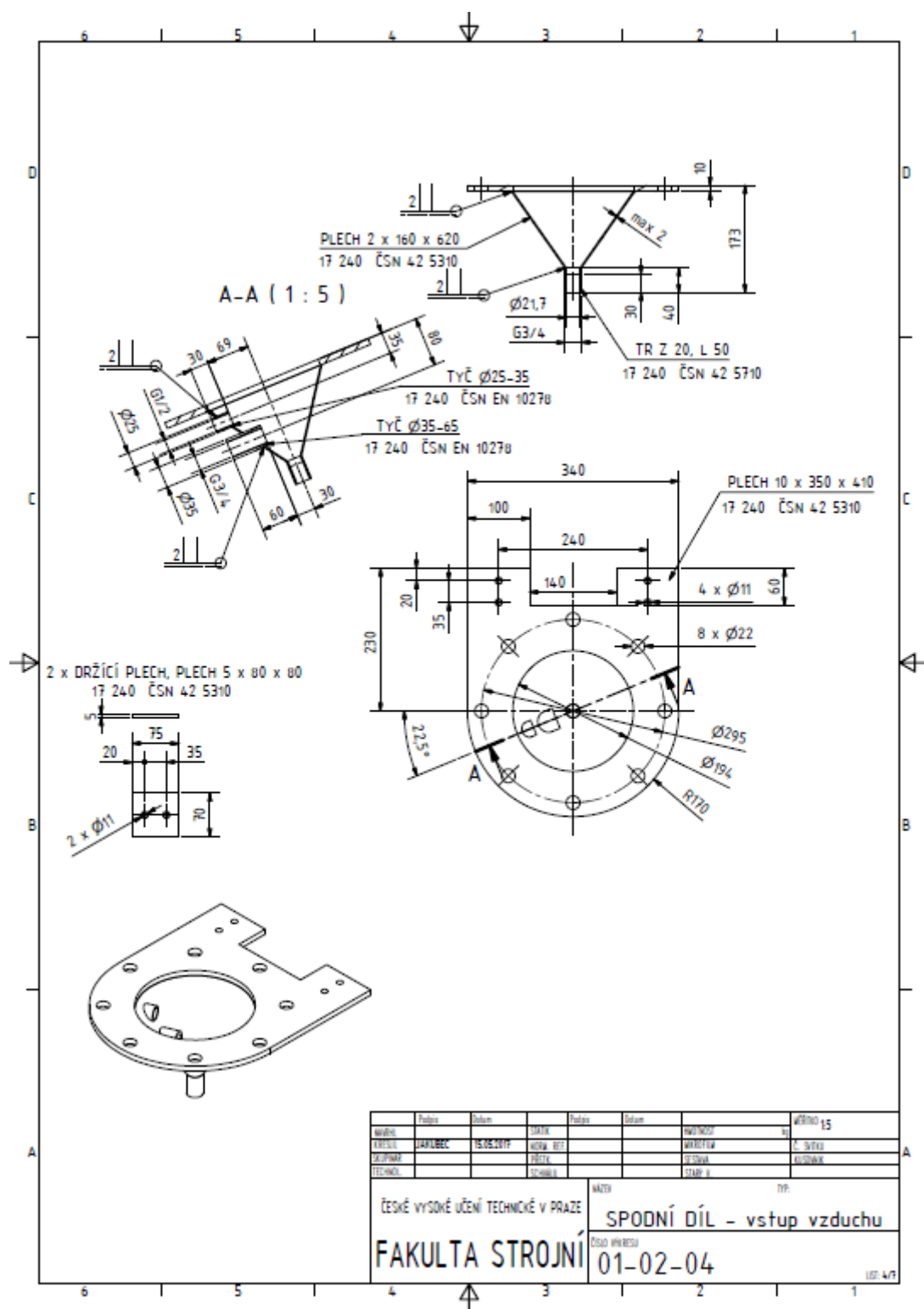
4 x plastová PVC trubka, která je požadována z průhledného materiálu, je jednak lehká a zároveň nám umožňuje optickou kontrolu lože. Její rozměr jsou 200 x 3 mm. Tyto segmenty jsou propojeny přírubovou spojkou 200 mm, kterou nabízí třeba firma MACEK a SYN, s r.o.



Spojka přírubová			Flange union		A	B	šrouby	D
057410090	B	Spojka přírubová 90 mm			200	110	M16 x 70	90
057410110	B	Spojka přírubová 110 mm			220	130	M16 x 80	110
057410125	B	Spojka přírubová 125 mm			250	155	M16 x 80	125
057410140	B	Spojka přírubová 140 mm			250	178	M16 x 80	140
057410160	B	Spojka přírubová 160 mm			285	186	M20 x 90	160
057410200	B	Spojka přírubová 200 mm			340	214	M20 x 90	200

Obr. 2.25. Katalog firmy MACEK a SYN, s r.o.

2.5.5 Spodní díl – vstup vzduchu



Obr. 2.26. Spodní díl – vstup vzduchu

Spodní díl umožňuje vstup vzduchu. Vzhledem k malému průměru zařízení není třeba instalovat rozdělovač vzduchu pro rovnoměrný nátok. Tento prvek je zároveň nosný pro celé zařízení a bude sloužit k upevnění na klec v laboratoři.

Připojovací prvky

Pro vstup vzduchu je kužel osazen tyčí s vnitřním závitem G $\frac{3}{4}$. Pro odtok skrápěcí vody je zde závitová trubka s vnějším závitem G $\frac{3}{4}$. Pro měření tlakové ztráty a připojení k manometru je zde tyč s vnitřním závitem G $\frac{1}{2}$.

Propojení pro manometr

Manometr bude propojen pomocí šroubení s vnějším trubkovým závitem a s trnem na hadici. Tyto prvky dodává například firma Kompresory Vzduchotechnika s.r.o.

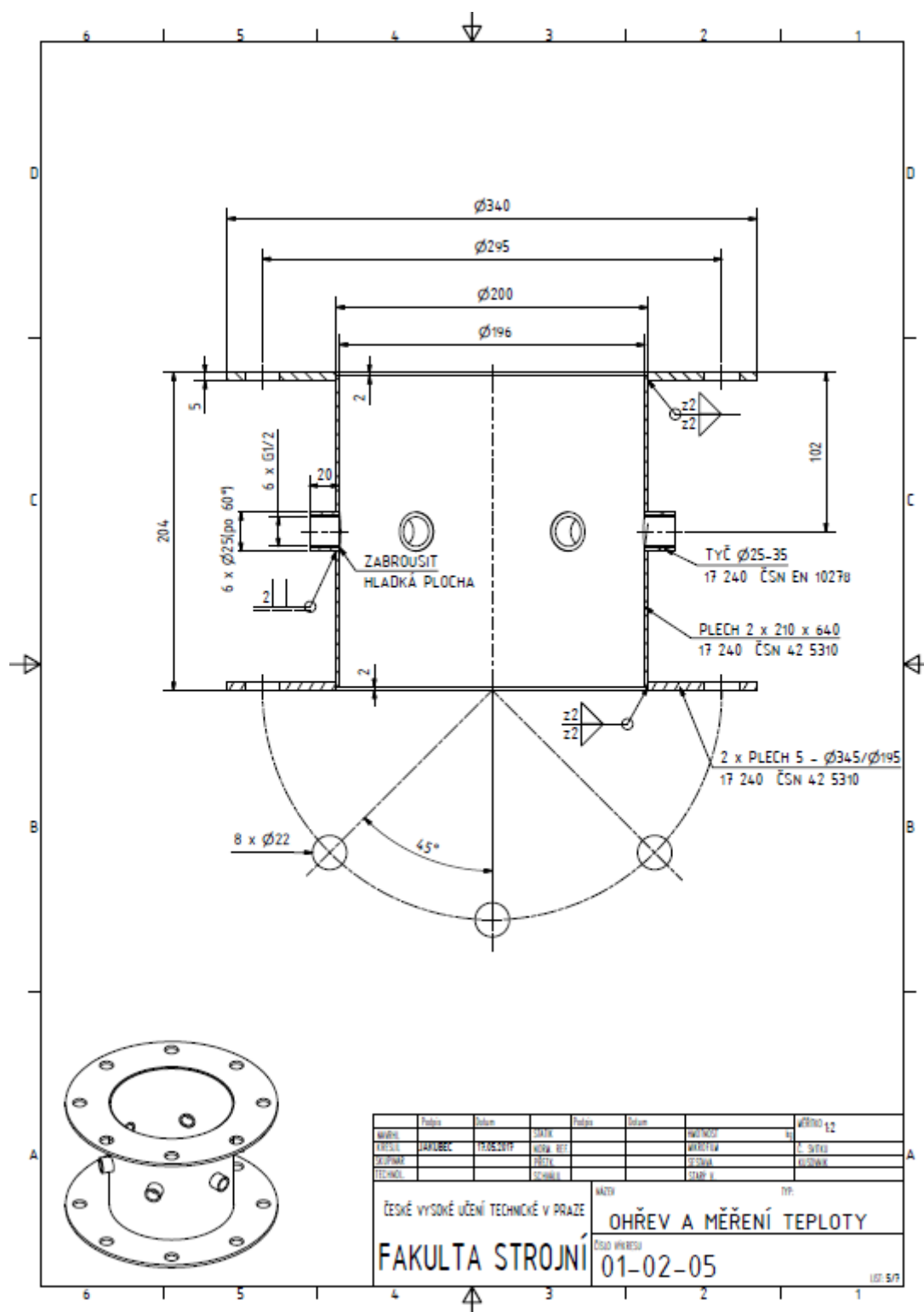
Šroubení s vnějším trubkovým závitem a s trnem na hadici						
	Obj. č.	Závit	Trn na hadici	○ SW	Tlak (bar)	Material
•	AX015-186	G 1/8"	6 mm	14	40	nerez 1.4571
•	AX015-189	G 1/8"	9 mm	14	40	nerez 1.4571
•	AX015-146	G 1/4"	6 mm	17	40	nerez 1.4571
•	AX015-149	G 1/4"	9 mm	17	40	nerez 1.4571
•	AX015-1413	G 1/4"	13 mm	17	40	nerez 1.4571
•	AX015-386	G 3/8"	6 mm	19	40	nerez 1.4571
•	AX015-389	G 3/8"	9 mm	19	40	nerez 1.4571
•	AX015-3813	G 3/8"	13 mm	19	40	nerez 1.4571
•	AX015-126	G 1/2"	6 mm	24	40	nerez 1.4571
•	AX015-129	G 1/2"	9 mm	24	40	nerez 1.4571
•	AX015-1213	G 1/2"	13 mm	24	40	nerez 1.4571



G

Obr. 2.27. Katalog firmy Kompresory Vzduchotechnika s.r.o.

2.5.6 Ohřev a měření teploty



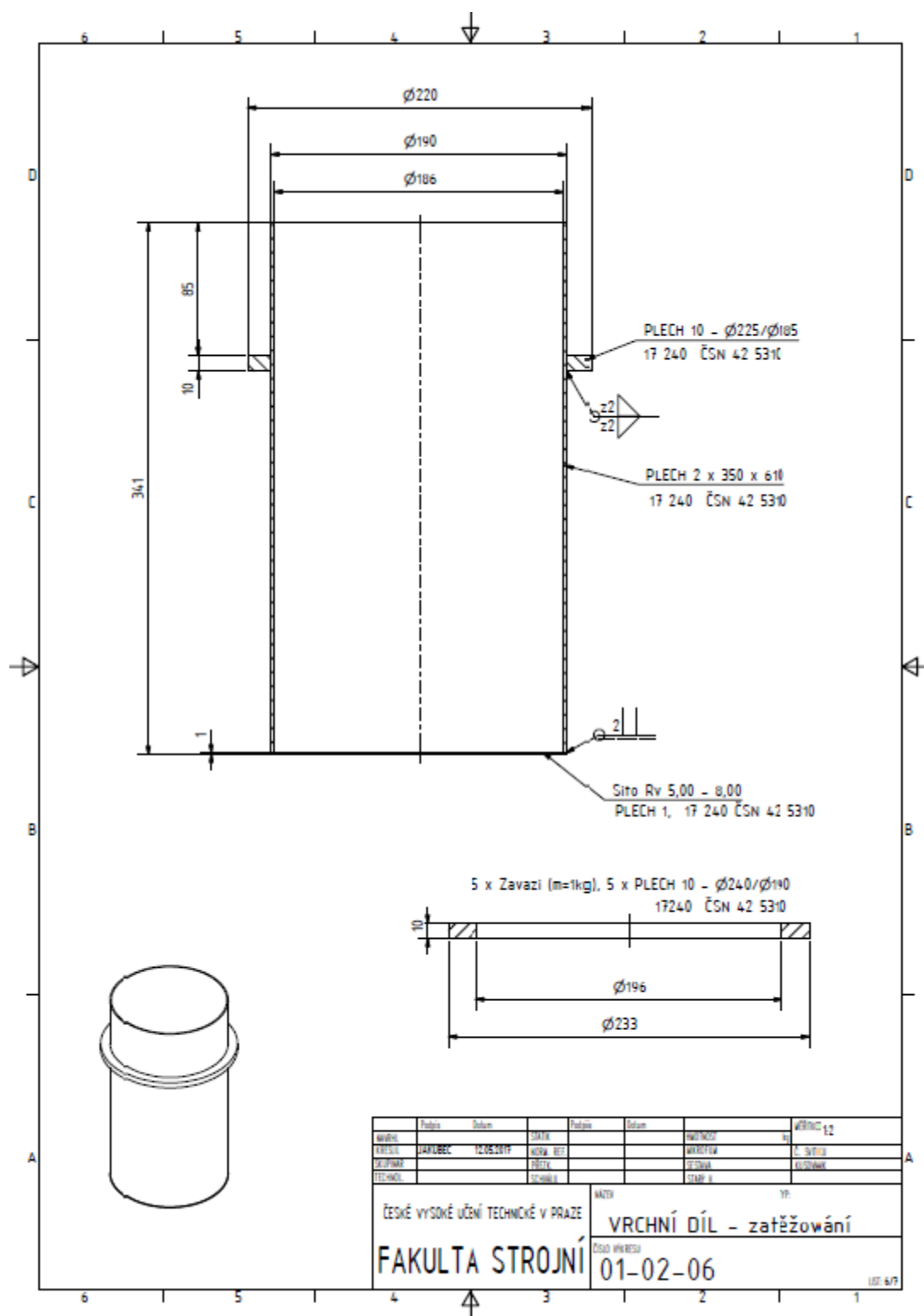
Obr. 2.28. Ohřev a měření teploty

Tento díl pro lokální ohřev lože a měření teploty je vyroben z nerezové ocele. Je vybaven 6 vstupy pro termočlánky, které umožní měřit teplotu v daném průřezu lože. Pro vstup termočlánků je zde vnitřní závit G 1/2.

Termočlánky a průchodky

Termočlánky a průchodky pro ně takzvané Compression Fittings dodává firma OMEGA Engineering.

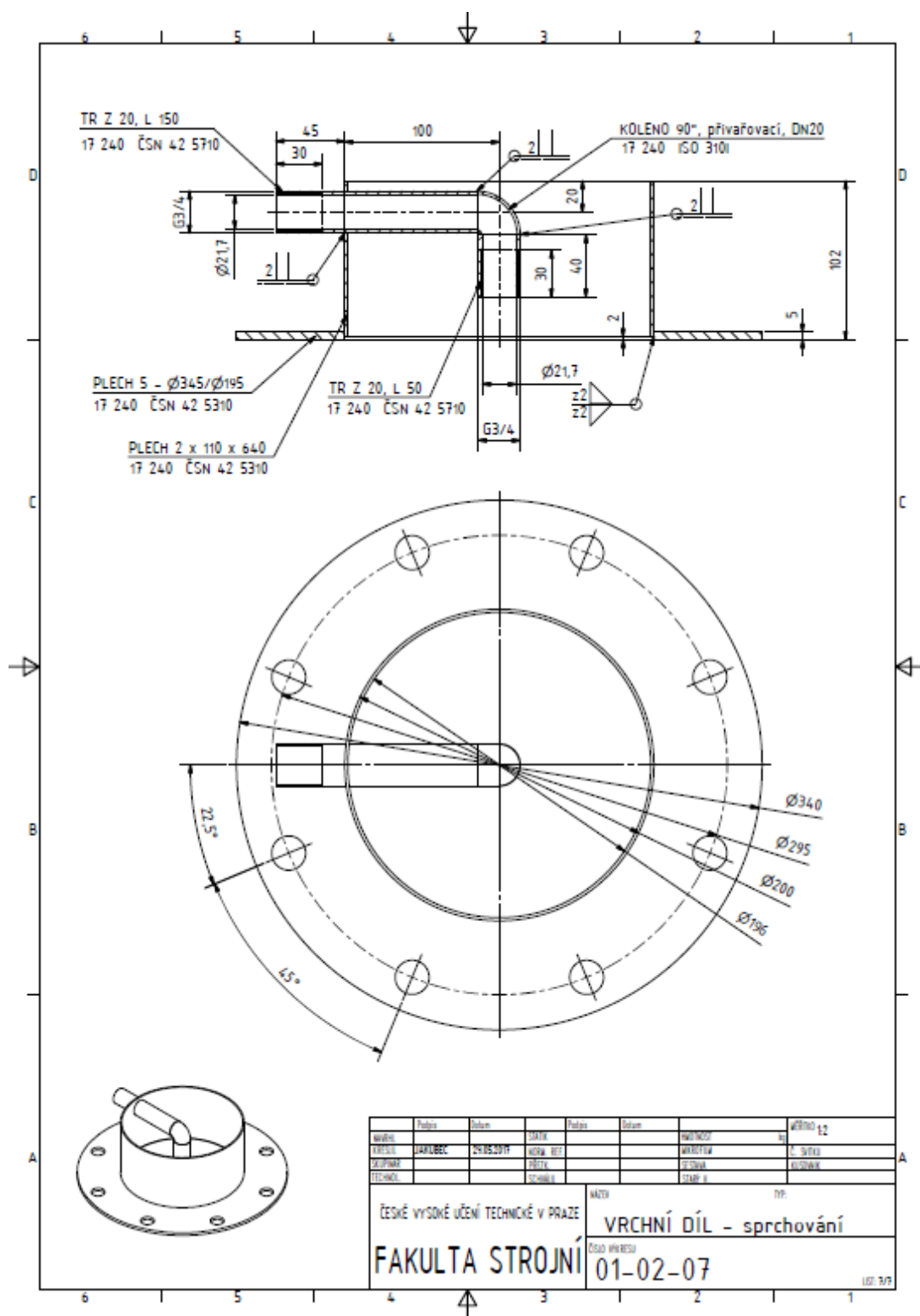
2.5.7 Vrchní díl – zatěžování



Obr. 2.29. Vrchní díl – zatěžování

Zatěžovací aparát má ve své spodní části děrovaný plech, který umožňuje jak stlačení vrstvy, tak i průchod plynu ven z filtračního lože. Zatěžování je možné regulovat pomocí 5 x 1 kg závaží.

2.5.8 Vrchní díl – sprchování

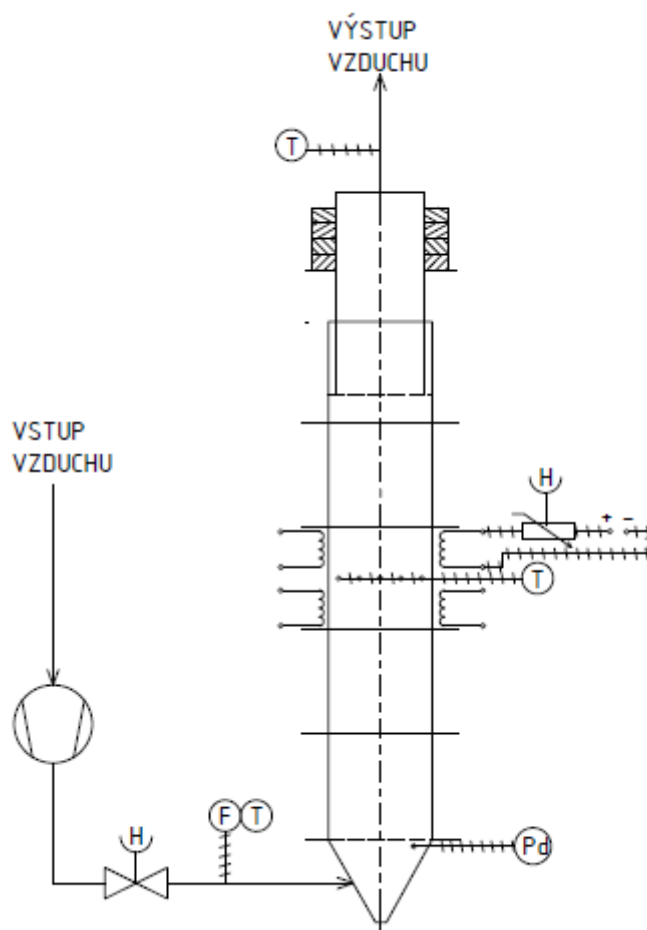


Obr. 2.30. Vrchní díl – sprchování

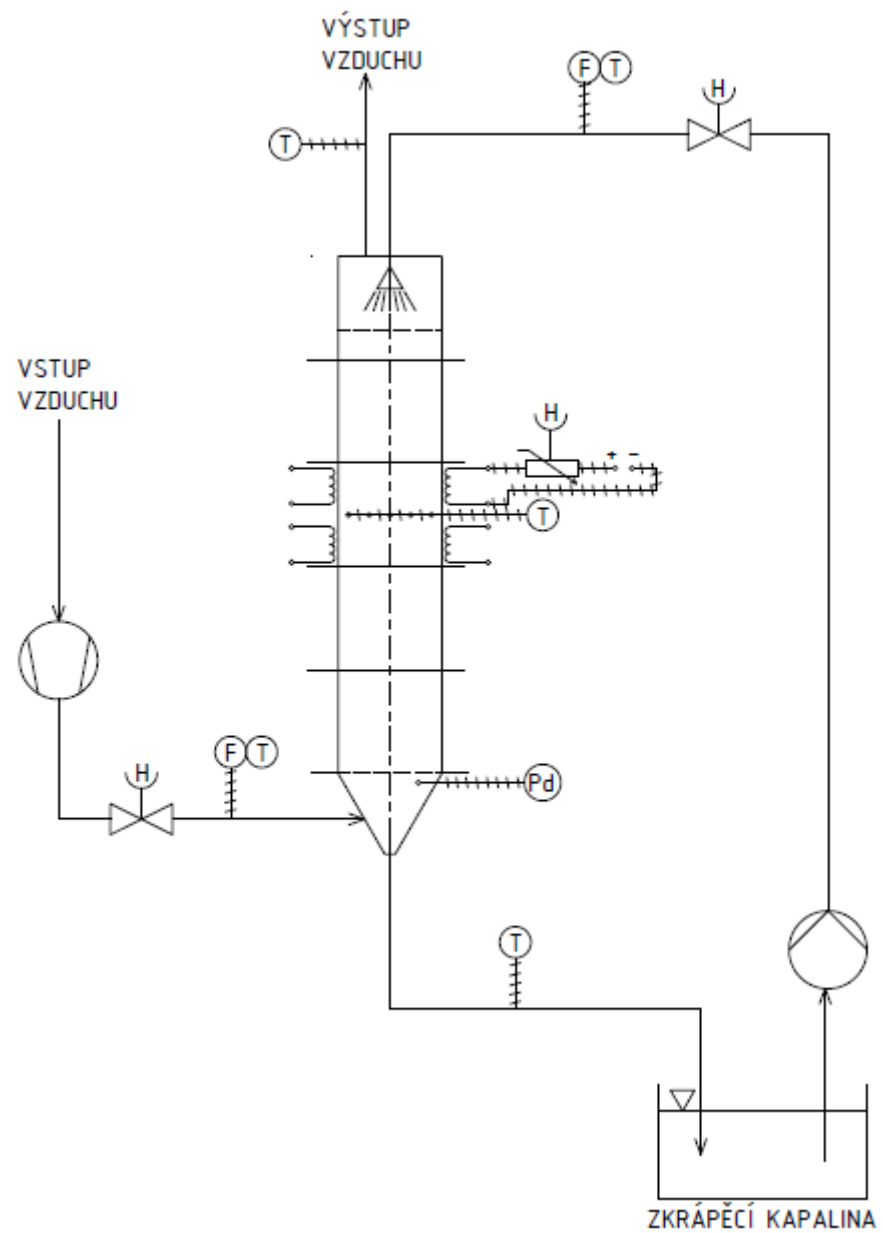
Sprchovací díl je vybaven vstupní trubicí pro vodu. Připojovacím rozměrem pro další součásti (např. sprchovací hlavice, přívod vody) je vnější závit G ¾.

2.6 KONCEPT MĚŘENÍ A REGULACE

Průtoky vzduchu a kapaliny budou nastavitelné ručními ventily a měřeny plováчковými průtokoměry. Pro regulaci výkonu topných pásů se využijí rezistory. Teplota bude měřena termočlánky typu K. K určení tlakové ztráty bude připojen U-manometr. Představa zapojené aparatury je vyobrazena na následujících dvou obrázcích.



Obr. 2.31. Koncept měření a regulace – filtr se zatěžováním



Obr. 2.32. Koncept měření a regulace – filtr se sprchou

3 SCALE-UP

Poznatky získané při experimentech jsem aplikoval na návrh laboratorního biofiltru. Rád bych však zde shrnul základní informace, které mohou posloužit k návrhu podobného zařízení. Dosažené vztahy z experimentů však platí pouze pro materiál lože, který byl poměřován. Základní charakteristikou pro scale-up je závislost (3-3). Při její znalosti se bude při návrhu postupovat následujícím způsobem.

Jestliže chceme změnit velikost zařízení, tak následné výpočty jsou založené na zachování konstantní rychlosti vzduchu u_0 na vstupu do filtru. Při průtocích $V_{\min} = 3000 \text{ l.h}^{-1}$, $V_{\max} = 11000 \text{ l.h}^{-1}$ jsou to rychlosti $u_{0,\min} = 0,15 \text{ m.s}^{-1}$ a $u_{0,\max} = 0,55 \text{ m.s}^{-1}$.

Nejprve si libovolně zvolíme nový průměr zařízení D a výšku vrstvy H . Z D nám vyplývá nový průřez S . Pokud však chceme dodržet podmínku konstantní rychlosti u_0 , je třeba změnit velikost průtoků vzduchu, neboť se mění s průřezem.

$$V_{vz} = u_0 \cdot S \quad (3-1)$$

Re' nezávisí na velikosti zařízení, ale pro stejné podmínky prostředí, materiál a rychlosti u_0 se jeho hodnota zachovává.

$$Re' = \frac{u_0 \cdot D_p \cdot \rho_{vz}}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_{vz}} \quad (3-2)$$

Pokud již známe Re' , je zapotřebí experimentálně naměřit a na základě regresní analýzy vyhodnotit závislost $\lambda' = f_{ce}(Re')$. Jako prvotní nástřel lze využít již určenou závislost z experimentů v kapitole 2.3.

$$\lambda' = 270,85 \cdot Re'^{-0,338} \quad (3-3)$$

Díky λ' jsem schopen určit novou tlakovou ztrátu vzduchu Δp_z průchodem zařízení, z níž pak vyplývá potřebná hnací síla kompresoru.

$$\Delta p_z = \lambda' \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{H}{D_p} \cdot u_0^2 \cdot \rho_{vz} \quad (3-4)$$

Pokud dochází ke zkrápění lože, je průtok vody maximálně poloviční oproti vzduchu.

$$V_{kap} = \frac{V_{vz}}{2} \quad (3-5)$$

ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem se zaměřil na návrh modulárního laboratorního zařízení pro stanovení procesních charakteristik dvoufázového toku. Cílem tedy bylo vyhodnotit charakteristické vlastnosti dodané vrstvy a na základě zjištěných parametrů navrhnout měřicí jednotku.

Vzhledem k širokému uplatnění dvoufázového toku v průmyslu jsem se blíže zaměřil na aplikaci v biofiltrech. Postupně jsem se seznámil s procesy a technologiemi využívanými při biofiltraci. Jedná se o čištění odpadního vzduchu, který v sobě nese polutanty (částice) organického nebo anorganického původu, které mohou zapáchat, případně jsou i zdraví škodlivé. Tyto látky jsou degradovány pomocí mikroorganismů, jež jsou obsaženy ve filtrační náplni. Znečištění využívají jako zdroj potravy a energii pro stavbu nové buněčné hmoty.

Nejprve jsem tedy vytvořil celkový přehled o biofiltrech, včetně jejich způsobu fungování, aplikace v daných odvětvích průmyslu, možnosti konstrukce a také jsem se zaměřil na teorii jednofázového a dvoufázového průtoku porézní vrstvou, který je pro ně charakteristický.

Od firmy CHEMCOMEX jsem obdržel složky materiálu filtrační náplně. Na provozním laboratorním zařízení jsem proměřil proudové charakteristiky jak jednotlivých prvků lože, tak i směs těchto materiálů. Hlavním úkolem bylo naměřit tlakovou ztrátu průchodem vrstvy. Tyto charakteristiky jsem na základě probrané teorie vyhodnotil a utvořil scale-up pro návrh modulárního laboratorního zařízení.

Konečně jsem tedy vytvořil kompletní výkresovou dokumentaci pro výrobu zařízení. Tento aparát bude zhotoven a umístěn ve školní laboratoři. Následně na něm budou provedena obdobná měření charakteristiky filtračního lože, jako v předložené práci.

Hlavním přínosem této práce je experimentální naměření a vyhodnocení procesních charakteristik typických materiálů, používaných v náplních biofiltrů. Dále je to kompletní výrobní dokumentace pro výrobu čtvrt-provozního laboratorního zařízení. Na něm budou původní výsledky ověřeny, případně zpřesněny. V neposlední řadě, tato práce může posloužit, jako návod pro vytvoření scale-up reálného zařízení, po vyhotovení navržené laboratorní

jednotky a naměření procesních charakteristik lože. Mnou navržený zkušební aparát je variabilní. Znamená to, že jeho aplikace není omezená na měření vlastností náplní biofiltru, ale obecně na určování charakteristik jednofázového a dvoufázového toku porézní vrstvou.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

ACIM-JOUANIN. 2017. Firemní prospekty [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.acim-jouanin.fr/tcheque/catalogue/Plats/elements%20souples%20silicone%20cz%20p1-p2.pdf>

ARMAT spol. s r.o. 2017. Firemní katalog [online]. [cit. 2017-07-18]. Dostupné z: <http://armat.cz/nerezove-sprchovaci-koule.html>

AUTERSKÁ Petra. *Vypracování návrhu metodiky měření zápachu na biofiltrech* [online]. MZLU v Brně. Brno 2006. 17 s. [cit. 2017-05-22].
Dostupné z: <http://www.cschi.cz/odour/files/0910-seminar/MZLU-ODOUR-Biofiltry.pdf>

BALTRENAS, Pranas a Edita BALTRENAITE. *A biofilter-adsorber*. 2015. EP 2826543 A1. Uděleno 2015-01-21. Zapsáno 2015-01-21.

Biologické metody zpracování odpadů. Biologické filtry a disky [online]. [cit. 2017-08-16]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/bmzo/pages/Biologicke_filtry.html

BUELNA, Gerardo. *Biofilter for purification of waste waters and method therefor*. 2000. US 09114078. Uděleno 2000-08-08. Zapsáno 2000-08-08.

HOFFMAN, Pavel. Podklady pro výuku předmětu Základy stavby procesních zařízení, 2012. [cit. 2017 - 08 - 16]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/pavel.hoffman/PREDMETY/ZSVZ/Foto/Ruzne/Resize%20of%20Kolona%20naplnova-nacrt.JPG>

HORN, Robert Jeffrey Horn. *Arrangement for air purification; and method*. 1999. US 5869323 A. Uděleno 1999-02-09. Zapsáno 1999-02-09.

CHEMCOMEX Praha, a.s. 2017. Dodané firemní podklady a materiál náplně biofiltru

KOMPRESORY VZDUCHOTECHNIKA s.r.o. 2017. Firemní katalog [online]. [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/c/spojovaci-material/sroubeni-a-tvarovky-z-nerezove-oceli/sroubeni-s-vnejsim-zavitem-a-s-trnem-na-hadici>

MACEK a SYN, s.r.o. 2017. Firemní katalog [online]. [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://eshop.macekasyn.cz/Tvarovky-a-trubky/PVC-U/Tvarovky/Priruby-a-manzety/PVC-spojka-prirubova.html>

MARADA, Petr a Petra AUTERSKÁ. *Provozování půdních biofiltrů v podmínkách zařízení na odstraňování nebo využití konfiskátů živočišného původu a živočišného odpadu* [online]. MZLU v Brně. Brno 2007. 45 s. [cit. 2017-03-17].

Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/32358/Zalozeni_a_obnova_vsazky_finale.pdf

MATĚJŮ, Vít: *Biofiltrace vzduchu*. Biom.cz [online]. 2005-01-31 [cit. 2017-08-14]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biofiltrace-vzduchu>. ISSN: 1801-2655.

RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03286-8.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1. Princip biofilmu (Marada, 2007)
- Obr. 1.2. Typy biofiltrace (Marada, 2007)
- Obr. 1.3. Schéma biofiltru s pevným ložem (Auterská, 2006)
- Obr. 1.4. Jednofázový průtok porézní vrstvou
- Obr. 1.5. Typy dvoufázového proudění porézní vrstvou
- Obr. 1.6. Tlaková diference a zadrž při dvoufázovém proudění vrstvou naplně
- Obr. 1.7. Dvoufázové proudění svislou trubicí
- Obr. 1.8. Závislost $K_y = f(K_x, \Delta p_{zd} / h)$
- Obr. 1.9. Biofiltr na čištění odpadní vody nebo plynu
- Obr. 1.10. Biofiltr s kapilárním zvlhčováním
- Obr. 1.11. Biofiltr s tokem shora dolů
- Obr. 1.12. Ideové schéma biofiltru 1 (CHEMCOMEX, 2017)
- Obr. 1.13. Ideové schéma biofiltru 2 (CHEMCOMEX, 2017)
- Obr. 1.14. Ideové schéma biofiltru 3 (CHEMCOMEX, 2017)
- Obr. 1.15. Sprchovací koule (firma ARMAT spol. s r.o.)
- Obr. 1.16. Distributor kapaliny (Hoffman)
- Obr. 1.17. Segnerovo kolo (Biologické metody zpracování odpadů)
- Obr. 1.18. Rozvod plynu v půdním biofiltru (Marada, 2017)
- Obr. 2.1. PTS magnetron
- Obr. 2.2. PTS vnější ohřev vody
- Obr. 2.3. PTS topný pás
- Obr. 2.4. Experimentální soustava
- Obr. 2.5. Schéma zapojení experimentální soustavy
- Obr. 2.6. Materiál filtračního lože
- Obr. 2.7. Měřicí aparatura porózy
- Obr. 2.8. Schéma U-manometru
- Obr. 2.9. Mulč
- Obr. 2.10. Kůra
- Obr. 2.11. Hobliny
- Obr. 2.12. Kukuřice
- Obr. 2.13. Štěpka

Obr. 2.14. Vermikulit

Obr. 2.15. Zeolit

Obr. 2.16. Basic design biofiltru se skrápěním

Obr. 2.17. Basic design biofiltru se zatěžováním

Obr. 2.18. 3D model zařízení se zatěžováním

Obr. 2.19. 3D model zařízení se sprchou

Obr. 2.20. Filtr se zatěžováním

Obr. 2.21. Topný pás (firma ACIM-JOUANIN)

Obr. 2.22. Filtr se sprchou

Obr. 2.23. Katalog firmy ARMAT spol. s r.o.

Obr. 2.24. Plastový díl

Obr. 2.25. Katalog firmy MACEK a SYN, s r.o.

Obr. 2.26. Spodní díl – vstup vzduchu

Obr. 2.27. Katalog firmy Kompresory Vzduchotechnika s.r.o.

Obr. 2.28. Ohřev a měření teploty

Obr. 2.29. Vrchní díl – zatěžování

Obr. 2.30. Vrchní díl – sprchování

Obr. 2.31. Koncept měření a regulace – filtr se zatěžováním

Obr. 2.32. Koncept měření a regulace – filtr se sprchou

SEZNAM GRAFŮ

- Graf 2.1. Vyhodnocení primárních naměřených dat – suchý materiál
- Graf 2.2. Vyhodnocení ve tvaru pro návrh zařízení – suchý materiál
- Graf 2.3. Vyhodnocení nezatížené chybou volby parametrů – suchý materiál
- Graf 2.4. Vyhodnocení primárních naměřených dat – vlhký materiál
- Graf 2.5. Vyhodnocení ve tvaru pro návrh zařízení – vlhký materiál
- Graf 2.6. Vyhodnocení nezatížené chybou volby parametrů – vlhký materiál
- Graf 2.7. Srovnání primárních naměřených dat – suchý a vlhký materiál
- Graf 2.8. Srovnání ve tvaru pro návrh zařízení – suchý a vlhký materiál
- Graf 2.9. Srovnání bez zatížení volbou parametrů – suchý a vlhký materiál
- Graf 2.10. Vyhodnocení přesnosti primárních naměřených dat
- Graf 2.11. Vyhodnocení přesnosti pro návrh zařízení
- Graf 2.12. Vyhodnocení přesnosti bez zatížení chybou volbou parametrů
- Graf 2.13. Mulč – primární naměřená data
- Graf 2.14. Kůra – primární naměřená data
- Graf 2.15. Hobliny – primární naměřená data
- Graf 2.16. Kukuřice – primární naměřená data
- Graf 2.17. Štěpka – primární naměřená data
- Graf 2.18. Vermikulit – primární naměřená data
- Graf 2.19. Zeolit – primární naměřená data
- Graf 2.20. Shrnutí primárních naměřených hodnot
- Graf 2.21. Shrnutí pro návrh experimentálního zařízení
- Graf 2.22. Shrnutí bez zatížení volbou parametrů

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1. Praktická aplikace biofiltrace vzdušín (Matějů, 2005)

Tab. 2.1. Suchý materiál – tlaková ztráta, naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 2.2. Vlhký materiál – tlaková ztráta, naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 2.3. Vyhodnocení přesnosti

SEZNAM SYMBOLŮ

A	povrch [m^2]
a	absolutní specifický povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]
a_v	vlastní specifický povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]
Cl_i	aktuální koncentrace látky i v kapalně fázi [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]
Cs_i	koncentrace látky i v kapalně fázi za rovnovážných podmínek [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]
D	průměr [m]
D_A	ekvivalentní průměr podle povrchu [m]
D_p	ekvivalentní průměr podle specifického povrchu [m]
D_v	ekvivalentní průměr podle objemu [m]
d_e	střední ekvivalentní průměr [m]
e_z	tlaková ztráta [Pa]
g	gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
H	výška hladiny [m]
h	výška náplně [m]
K_L	koeficient rychlosti přenosu hmoty [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
M_i	rychlost přenosu hmoty látky i [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]
m	hmotnost [kg]
p	tlak [Pa]
ppm	parts per million = dílů či částic na jeden milion [1]
Re	Raynoldsovo číslo [1]
S	průřez [m^2]
s	zádrž [1]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
t	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
u	rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
V	objem [m^3]
\dot{V}	průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
w	hustota hmotnostního toku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
ε	porózita [1]
μ	dynamická viskozita [Pa.s]
ρ	hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]